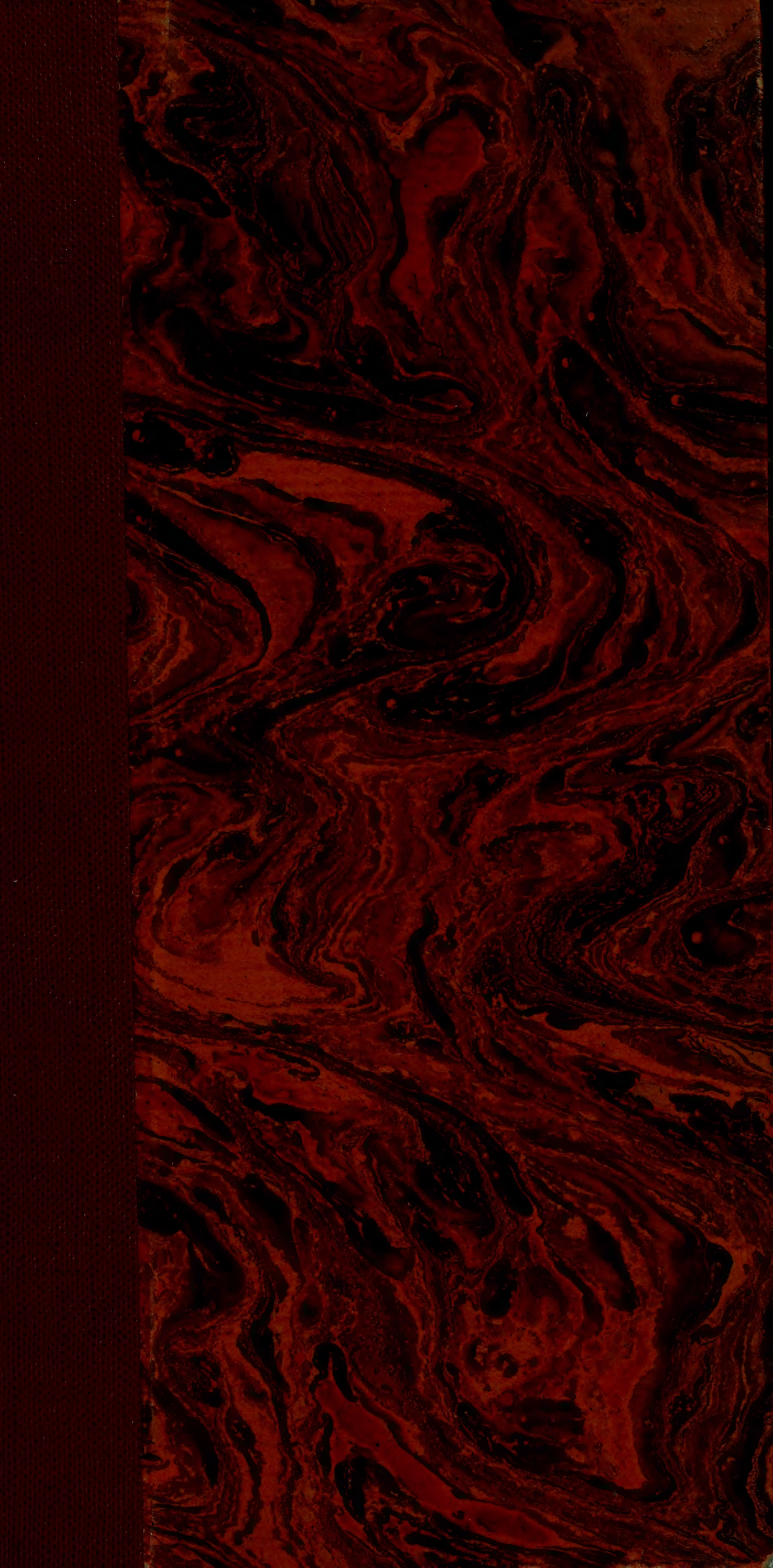


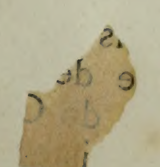
229

12^{00}

THÉORIE PHYSIOLOGIQUE

DE

LA MUSIQUE



DU MÊME AUTEUR

OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

TRADUITE

Par MM. E. JAVAL et N. KLEIN

CORBEIL. — Typ. et stér. de CRÉTÉ.

THÉORIE PHYSIOLOGIQUE

DE

LA MUSIQUE

FONDÉE SUR L'ÉTUDE

DES SENSATIONS AUDITIVES

PAR

H. HELMHOLTZ

Docteur en médecine et en philosophie, professeur de physiologie
à l'Université de Heidelberg, membre étranger des Sociétés royales de Londres
et d'Edimbourg, de l'Académie d'Amsterdam, membre correspondant de l'Académie de médecine
de Paris et de Bruxelles, des Académies de Berlin, Vienne,
Munich, Göttingen, etc.

TRADUIT DE L'ALLEMAND

PAR M. G. GUÉROULT

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

AVEC LE CONCOURS POUR LA PARTIE MUSICALE

DE M. WOLFF

De la maison PLEYEL, WOLFF et Cie

AVEC FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS

VICTOR MASSON ET FILS

PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE

1868

Avant d'être traduit en français, ce livre a déjà trouvé auprès d'un grand nombre de savants et de musiciens français un accueil plus favorable que je n'aurais osé l'espérer. Il m'a semblé, et j'ai pu m'en convaincre dans les deux voyages que j'ai faits à Paris, il m'a semblé, dis-je, que la connaissance de la musique et l'aptitude à suivre des excursions dans le domaine des sciences exactes, se trouvaient plus fréquemment réunies en France que cela n'a ordinairement lieu dans les autres pays de l'Europe, pour des études d'une nature aussi différente. J'ai donc vu avec le plus grand plaisir disparaître dans cette traduction, qui m'a semblé bien faite, les obstacles que la différence de langue opposait à la lecture de mon ouvrage. Pour pouvoir répondre moi-même, autant que possible, de la fidélité de la traduction, j'ai revu les épreuves, et même, en quelques endroits, j'ai fait des modifications au texte original ou ajouté des éclaircissements. De même, à la fin du volume, il a été ajouté quelques nouveaux suppléments relatifs à des questions de physique ou de mathématiques.

Je n'ai trouvé aucun motif de modifier essentiellement les aperçus théoriques que renferme mon livre. On a attaqué surtout, parmi les musiciens, ce que j'avais dit au sujet de la différence entre le majeur et le mineur. Mais ma conviction a résisté à toutes les objections qui m'ont été opposées, et je crois encore

aujourd'hui que la pratique des grands maîtres est ici en contradiction avec les théories musicales ordinairement enseignées, tandis qu'elle s'accorde avec la manière dont j'ai présenté les choses.

En revanche, je dois avouer que j'ai beaucoup moins de confiance dans ce que j'ai dit sur l'histoire de la musique. Ce que nous savons sur ce sujet présente généralement tant de lacunes, que beaucoup de choses y demeurent encore à l'état d'hypothèses. Je ne puis même me considérer comme bien expert en pareille matière, et les sources que j'ai eues à ma disposition n'étaient pas très-nombreuses. C'est là un domaine sur lequel on a fait, en France et en Belgique, des travaux beaucoup plus approfondis que chez nous; aussi dois-je réclamer l'indulgence du lecteur, s'il venait à constater de notables erreurs dans cette partie de mon travail.

H. HELMHOLTZ.

HEIDELBERG, avril 1868.

INTRODUCTION

On s'est proposé dans cet ouvrage de rapprocher, sur leurs frontières communes, des sciences qui, malgré les nombreux rapports naturels qui les unissent, malgré leur voisinage mutuel, sont restées jusqu'ici trop isolées les unes des autres. Il s'agit, d'une part, de l'acoustique physique et physiologique, et, d'autre part, de la science musicale et de l'esthétique. Ce livre s'adresse, par conséquent, à des groupes de lecteurs engagés, chacun dans des voies intellectuelles bien différentes, à la poursuite d'intérêts bien distincts. Il ne sera donc pas inutile que l'auteur explique, dès l'abord, dans quelle pensée il a entrepris ce travail, et quel but il s'est efforcé d'atteindre.

Dans les temps modernes, les domaines respectifs de la Science, de la Philosophie et de l'Art ont été séparés plus que de raison, et il en résulte, pour chacun des groupes correspondants, une certaine difficulté à comprendre la langue, la méthode et l'objet des autres. C'est là ce qui doit avoir surtout empêché les questions dont il s'agit ici, d'avoir été depuis longtemps étudiées plus à fond, et d'être arrivées, l'une par l'autre, à leurs solutions respectives.

A la vérité, l'acoustique emploie à chaque instant, des idées et des mots empruntés à la science harmonique ; elle parle de la gamme, des intervalles, des accords, etc. ; de leur côté, les traités d'*Harmonie* commencent bien, d'ordinaire, par un chapitre consacré à la physique, qui traite des nombres de vibrations des sons, et qui fixe les rapports de ces nombres pour les différents intervalles ; seulement, jusqu'ici, ce rapprochement de l'acoustique et de la science musicale est resté purement extérieur, plutôt comme un signe qu'on reconnaît la nécessité d'une union entre les deux sciences, que comme la preuve que l'on a su la réaliser effectivement.

Si les connaissances physiques ont pu être utiles aux facteurs d'instruments, elles n'ont en revanche favorisé en aucune manière le

développement et l'établissement de la science de l'harmonie. Et cependant, les faits les plus fondamentaux de la théorie musicale, ceux qu'elle aurait dû expliquer et utiliser les premiers, sont connus depuis les temps les plus reculés. Pythagore savait déjà que, pour que des cordes de même nature, soumises à la même tension, mais d'inégales longueurs, puissent donner les consonnances parfaites de l'octave, de la quarte, de la quinte, il faut que leurs longueurs respectives soient entre elles, dans le rapport de 1 à 2, de 2 à 3, de 3 à 4. Si, comme il y a lieu de le penser, Pythagore lui-même tenait en partie ses connaissances des prêtres égyptiens, il est presque impossible d'imaginer à quelle inconcevable antiquité remonte la connaissance de cette loi. La physique moderne a généralisé la loi de Pythagore, en l'étendant des longueurs de cordes aux nombres de vibrations, et la rendant applicable aux sons de tous les instruments ; on a trouvé aussi, pour les consonnances moins parfaites des tierces, des rapports numériques simples, les rapports de 4 à 5, de 5 à 6. Néanmoins, il n'est pas à ma connaissance qu'on ait fait un progrès réel dans la réponse à cette question : Qu'est-ce que les accords musicaux peuvent avoir à démêler avec les rapports des six premiers nombres entiers ?

Les musiciens, aussi bien que les philosophes et les physiciens, se sont, la plupart du temps, bornés à répondre que l'âme humaine, par un mécanisme quelconque, inconnu de nous, avait la faculté d'apprécier les rapports numériques des vibrations sonores, et qu'elle éprouvait un plaisir particulier à trouver devant elle des rapports simples et facilement perceptibles.

Pendant ce temps-là, pour les questions dont la solution appartient plutôt au domaine de la psychologie qu'à celui des phénomènes des sens, l'esthétique musicale a fait d'incontestables progrès, particulièrement en appuyant sur l'idée de *mouvement*, dans l'examen des compositions musicales. E. Hanslick, dans son livre sur le beau musical, a dirigé de justes critiques contre le faux point de vue de sentimentalisme exagéré où l'on aime ordinairement à se placer pour faire des théories sur la musique, et il a ramené la question à l'élément simple du mouvement mélodique.

Nous trouvons les proportions esthétiques de l'architectonique des compositions musicales, ainsi que les caractères distinctifs de chaque genre, déterminées avec plus de développements, dans l'esthétique de Vischer. Dans le monde inorganique, la nature du mouvement révèle la nature des forces qui le produisent, et même en dernière analyse, les forces élémentaires ne peuvent être ni connues ni mesurées autrement que par les mouvements dus à leur action ; il en est de même des

mouvements du corps ou des inflexions de la voix, qui s'exécutent sous l'influence des dispositions de l'âme. Les particularités du mouvement des sons qui donnent le caractère de la grâce, de la vivacité ou de la lourdeur, de la fatigue, de l'abattement ou de l'énergie, du calme ou de l'exaltation, dépendent évidemment et surtout de mobiles psychologiques. Il en est exactement de même de la solution des questions qui concernent la pondération des différentes parties d'un morceau, leur filiation réciproque, leur réunion en un seul tout, clair et facile à saisir, questions qu'on retrouve presque exactement les mêmes dans la théorie de l'architecture.

Mais toutes ces recherches esthétiques, malgré les conquêtes de tout genre qu'elles font de jour en jour, sont condamnées à rester vagues et incertaines, tant qu'il leur manquera le vrai point de départ, le principe fondamental, c'est-à-dire la base scientifique des règles élémentaires pour la construction de la gamme, des accords, des modes, et généralement de tout ce qui est ordinairement compris dans ce qu'on appelle l'harmonie. Dans ces domaines élémentaires, nous avons affaire non-seulement aux libres inventions de l'art, mais encore à une aveugle et inflexible loi de la nature, aux activités physiologiques de la sensation.

La musique se rattache à la sensation pure et simple, par des liens bien plus étroits que tous les autres arts, qui ont affaire plutôt aux perceptions nous venant des sens, c'est-à-dire aux notions sur les objets extérieurs, que nous tirons des sensations par des procédés psychiques. La poésie cherche surtout à exciter en nous les impressions les plus variées, en s'adressant presque exclusivement à l'imagination et à la mémoire, et ce n'est que d'une manière secondaire, par le secours plus musical du rhythme, par exemple, de l'harmonie du langage, qu'elle s'adresse quelquefois immédiatement à la sensation de l'ouïe. Son action repose donc presque exclusivement sur des activités psychiques.

Les arts plastiques ont besoin, il est vrai, de la sensation de la vue, mais dans un but peu différent de celui que poursuit la poésie en s'adressant à l'oreille. Ils veulent principalement faire naître en nous l'image d'un objet extérieur, d'une forme et d'une couleur déterminées. Nous devons nous intéresser essentiellement à l'objet représenté, jouir de sa beauté, et non des moyens qui ont servi à le représenter. Du moins, le plaisir que fait éprouver au connaisseur la perfection technique d'un tableau ou d'une statue, ne fait pas partie intégrante de la jouissance artistique.

Dans la peinture, la couleur est le seul élément qui s'adresse immédiatement à la sensation, sans l'intermédiaire d'un acte de l'entende-

ment. Dans la musique, au contraire, les sensations auditives sont précisément ce qui forme la matière de l'art ; nous ne transformons point ces sensations, au moins dans les limites où elles appartiennent à la musique, en symboles d'objets ou de phénomènes extérieurs. En d'autres termes, bien que, dans un concert, il nous arrive de distinguer certains sons produits, les uns par le violon, d'autres par la clarinette, la jouissance artistique ne réside pas dans la représentation que nous nous faisons de l'existence matérielle du violon ou de la clarinette, mais dans la sensation des sons qui en émanent. Au contraire, la jouissance artistique produite par une statue de marbre, ne réside pas dans la sensation de la lumière blanche qui arrive à l'œil, mais dans la reproduction de la beauté des formes humaines. Dans ce sens, il est évident que la musique a, avec la sensation proprement dite, des liens plus immédiats qu'aucun des autres arts ; il s'ensuit que la théorie des sensations auditives sera appelée à jouer, dans l'esthétique musicale, un rôle beaucoup plus essentiel que la théorie de l'éclairement ou de la perspective, dans la peinture. Ces deux dernières sciences sont sans doute utiles au peintre, pour atteindre autant que possible à une fidèle représentation de la nature, mais elles n'ont rien de commun avec l'effet artistique de l'œuvre. Dans la musique, au contraire, il ne s'agit pas d'arriver à la fidèle représentation de la nature ; les sons et les sensations correspondantes sont là pour eux-mêmes, et agissent tout à fait indépendamment de leur rapport avec un objet extérieur quelconque.

Cette théorie des sensations de l'ouïe tombe dans le domaine des sciences naturelles, et, tout d'abord, de l'acoustique physiologique. Jusqu'ici, on n'a traité avec détail la science des sons que dans sa partie physique, c'est-à-dire qu'on a étudié les mouvements des corps sonores solides, liquides et gazeux, lorsqu'ils apportent à l'oreille un son perceptible. Dans son essence, cette acoustique physique n'est rien autre chose qu'une subdivision de la théorie des mouvements des corps élastiques. Observer, au moyen d'une spirale ou d'un fil de laiton, les vibrations d'une corde tendue, dont les mouvements sont assez lents pour être facilement suivis de l'œil, et par suite pour ne produire aucune sensation auditive, ou bien faire vibrer une corde de violon dont les vibrations, presque imperceptibles à la vue, agissent sur l'ouïe, c'est, au point de vue physique, absolument la même chose. Les lois des mouvements vibratoires sont exactement les mêmes dans les deux cas, et la lenteur ou la rapidité est un élément qui ne peut y rien changer ; elle force seulement le physicien à recourir à diverses méthodes d'observation, à utiliser tantôt la vue, tantôt l'ouïe. Dans l'acoustique physique, il n'y aura donc à prendre en considération les

phénomènes de l'ouïe, que parce que l'oreille fournit le moyen le plus commode et le plus accessible d'observer les rapides vibrations des corps élastiques, et le physicien doit connaître les propriétés de cet instrument naturel d'observation, pour pouvoir tirer les conséquences véritables des renseignements qu'il peut en recevoir. Aussi, jusqu'à présent, l'acoustique physique a-t-elle bien recueilli en grand nombre des découvertes et des observations qui appartiennent à la science des phénomènes de l'audition, et par conséquent, à l'acoustique physiologique, mais ce n'était pas l'objet principal des recherches effectuées ; tous ces résultats n'ont été trouvés qu'accidentellement, morceau par morceau. On rencontre, en général, dans les traités de physique, un chapitre à part sur l'acoustique, détaché de la théorie de l'élasticité, à laquelle il devrait appartenir par la nature des choses, mais qui seulement tire sa raison d'être de ce fait, que l'ouïe a été la source de découvertes et de méthodes d'observation d'une espèce particulière.

A côté de l'acoustique physique, il existe une acoustique physiologique qui a pour objet l'étude des phénomènes qui se produisent dans l'oreille elle-même. La partie de cette science qui traite du chemin parcouru par la vibration sonore, depuis l'oreille externe jusqu'à l'épanouissement des nerfs dans l'oreille interne, a fait l'objet de nombreux travaux, particulièrement en Allemagne, depuis les premières investigations de J. Müller dans cette voie. Nous pouvons dire cependant qu'il n'y a pas eu, dans cette ligne, un bien grand nombre de résultats établis d'une manière certaine. Ces recherches n'ont d'ailleurs embrassé qu'un côté de la question ; l'autre restait entièrement inexploré.

L'étude des phénomènes qui se produisent dans chacun des organes de nos sens comprend, en général, trois parties distinctes. — Premièrement, il y a à rechercher comment l'agent extérieur qui produit l'impression (la lumière pour l'œil, le son pour l'oreille) pénètre jusqu'aux nerfs. Nous pouvons appeler cette première partie, la portion physique de l'étude physiologique. — Deuxièmement, il faut s'occuper des diverses excitations nerveuses correspondant aux diverses *sensations ;* — enfin, rechercher les lois d'après lesquelles ces sensations se transforment en images d'objets extérieurs déterminés, c'est-à-dire en *perceptions.* Ceci donne donc encore une deuxième subdivision plutôt physiologique, consacrée à l'étude des sensations, et une troisième, psychologique, qui traite des *perceptions.* — Tandis que la partie physique de la science acoustique a été déjà prise en grande considération par les savants, nous ne possédons jusqu'ici, pour la partie physiologique et psychologique, que des résultats incomplets, isolés au hasard dans la science. Or, c'est précisément aux lois des

sensations auditives qu'une théorie musicale vraiment scientifique doit emprunter ses résultats fondamentaux.

Dans l'ouvrage qu'on va lire, je me suis d'abord efforcé de rassembler, autant que possible, tous les matériaux de la science des sensations auditives, ceux déjà trouvés précédemment et ceux que mes recherches personnelles ont pu ajouter à l'ensemble. Naturellement, un premier essai de ce genre doit rester passablement incomplet, et se limiter aux traits fondamentaux, aux parties les plus intéressantes. C'est à ce point de vue que je prie d'accueillir les études qui vont suivre. On ne trouvera dans les propositions rassemblées, qu'un petit nombre de découvertes tout à fait nouvelles; ce qu'il peut y avoir de nouveau dans les faits et dans les considérations, se présente le plus souvent comme la conséquence des théories et des méthodes d'expérience déjà connues, poussée seulement plus loin que cela n'avait été fait jusqu'ici. Je pense cependant que les faits acquièrent une nouvelle importance, s'éclairent d'une nouvelle lumière, si on les considère à un autre point de vue, et autrement groupés que par le passé.

La première partie des recherches qui suivent est essentiellement consacrée aux questions physiques et physiologiques. On y étudie le phénomène des sons harmoniques; on détermine la nature de ce phénomène, on prouve sa liaison avec la différence des timbres, et on analyse une série de timbres au point de vue des sons harmoniques qu'ils présentent. De tout cela il ressort que les sons harmoniques ne sont pas seulement, comme on l'avait cru généralement jusqu'ici, un phénomène isolé, d'une intensité secondaire, mais qu'ils existent au contraire, à très-peu d'exceptions près, dans le son de presque tous les instruments, et qu'ils atteignent une importance considérable, précisément dans les timbres les plus employés dans la musique. La question de savoir comment la perception des sons harmoniques peut se faire au moyen de l'ouïe, nous conduit ensuite à une hypothèse sur le mode d'excitation des nerfs auditifs, qui est de nature à ramener tous les faits, toutes les lois de cet ordre, à une représentation mécanique relativement simple.

La seconde partie traite des effets de l'audition de deux sons simultanés, particulièrement des sons résultants et des battements. L'étude physico-physiologique prouve que deux sons ne peuvent être simultanément perçus par l'oreille, sans se nuire réciproquement par leur voisinage, qu'autant qu'ils sont entre eux dans des rapports d'intervalle parfaitement déterminés, les intervalles bien connus des consonnances musicales. Nous arrivons ici immédiatement dans le domaine de la musique, et nous découvrons la base physiologique de

la mystérieuse loi des rapports numériques trouvée par Pythagore. La grandeur des intervalles consonnants est indépendante du timbre, mais la douceur des consonnances, la dureté des dissonnances se manifestent comme liées à cet élément. Les conclusions de la théorie physiologique concordent entièrement sur ce point avec les règles de l'harmonie ; elles entrent même dans plus de détails et ont pour elles, à ce que je crois, l'autorité des meilleurs compositeurs.

Dans ces deux premières parties de l'ouvrage, les aperçus esthétiques n'entrent point du tout en jeu ; il s'agit uniquement de phénomènes naturels soumis à une aveugle nécessité. La troisième partie traite de la construction des gammes et des modes. Ici nous nous trouvons sur le terrain esthétique ; ici commencent les variétés du goût national et individuel. La musique moderne a principalement développé, dans toute la rigueur de ses conséquences, le principe de la tonalité, d'après lequel tous les sons d'un morceau sont déterminés par leur parenté avec un son principal, la tonique. Ce principe une fois admis, les résultats des recherches précédentes permettent de déduire la construction des gammes modernes et des modes, d'une manière qui exclut tout arbitraire.

Je n'ai pas voulu séparer l'étude physiologique d'avec l'exposé des conséquences musicales, parce que, d'une part, pour le physiologiste, l'exactitude de ces déductions vient confirmer l'exactitude des considérations physiques et physiologiques d'où elles émanent, et que, d'autre part, pour le lecteur qui ouvre le livre sous l'influence de préoccupations musicales, la signification, la portée des résultats, ne peuvent devenir tout à fait claires, s'il n'a essayé de comprendre au moins le sens des principes scientifiques. Au reste, pour maintenir l'ouvrage à la portée des lecteurs auxquels des connaissances approfondies en physique et en mathématiques feraient défaut, j'ai renvoyé au supplément qu'on trouvera à la fin du volume, les développements spéciaux pour l'explication des expériences plus délicates, aussi bien que toutes les démonstrations mathématiques. Ce supplément est donc particulièrement destiné aux physiciens, et contient les preuves à l'appui de mes assertions. J'espère ainsi avoir fait la part aux préoccupations de chacun.

Cependant, l'intelligence complète de mes théories ne sera accessible au lecteur qu'autant qu'il prendra la peine d'apprendre à constater, par ses observations personnelles, au moins les phénomènes fondamentaux dont il est question dans le cours de ces études. Il n'est heureusement pas bien difficile, avec le secours des instruments de musique les plus usuels, d'apprendre à connaître les harmoniques, les sons résultants, les battements, etc. Une impression personnelle

vaut mieux que la plus belle description, surtout quand il s'agit, comme ici, d'une analyse de sensations qu'on ne peut décrire qu'assez mal à qui ne les a pas éprouvées par lui-même.

Dans cet essai quelque peu nouveau d'unir sur un même terrain la science et les théories esthétiques, j'espère avoir convenablement distingué ce qui appartient à la physiologie et à l'esthétique ; je ne puis pourtant me dissimuler que mes démonstrations, bien que se rapportant uniquement au domaine inférieur de la grammaire musicale, pourront répugner comme trop mécaniques, comme rabaissant la dignité de l'art, à certains esthéticiens qui sont habitués à apporter, même dans la recherche scientifique de leurs principes, les dispositions les plus enthousiastes, comme s'ils étaient entraînés sur les plus hauts sommets de l'art. Je me bornerai à leur faire remarquer, qu'il ne s'agit essentiellement dans ce livre que de l'analyse de sensations reposant sur des faits ; que les observations physiques et méthodiques qui y sont contenues, n'ont d'autre but que d'éclairer, d'assurer le travail de l'analyse, et d'en contrôler l'exactitude ; enfin, que cette analyse des sensations suffirait à fournir à la théorie musicale ses résultats fondamentaux, même sans le secours de l'hypothèse physiologique dont j'ai déjà parlé sur le mécanisme de l'audition. Je n'ai pas voulu la laisser de côté, parce qu'elle est de nature à établir un lien extraordinairement simple entre les phénomènes si multiples et si compliqués dont il s'agit.

PREMIÈRE PARTIE

COMPOSITION DES VIBRATIONS

HARMONIQUES ET TIMBRES.

CHAPITRE PREMIER

DE LA SENSATION AUDITIVE EN GÉNÉRAL.

Les diverses sensations se produisent lorsque des causes extérieures agissent sur l'appareil des nerfs de la sensibilité, et déterminent en lui un certain état d'excitation. La nature de la sensation varie, soit en raison du sens qui est mis en jeu, soit en raison de la nature de la cause extérieure. A chacun de nos sens correspondent des sensations *sui generis*, qui ne peuvent se produire par l'intermédiaire d'aucun autre organe ; l'œil donne la sensation de la lumière, l'oreille celle du son, la peau celle du toucher. Les mêmes rayons du soleil qui excitent dans l'œil la sensation de la lumière, s'ils viennent à rencontrer la peau, à en exciter les nerfs, donneront seulement la sensation de la chaleur, non celle de la lumière; de même, les ébranlements des corps élastiques, *entendus* par l'oreille, sont aussi perçus par la peau, non plus comme un son, mais comme des trépidations. La sensation auditive est donc la réaction particulière à l'oreille, en présence d'une cause extérieure d'excitation ; elle ne peut être produite par aucun autre organe, et se distingue entièrement de toutes les impressions reçues par les autres sens.

Comme nous nous proposons ici d'étudier les lois des sensations auditives, notre première préoccupation sera de rechercher combien de natures distinctes d'impressions notre oreille peut percevoir, et à quelles différences dans les agents extérieurs, particulièrement dans le son, correspondent ces différences dans les sensations éprouvées.

La première et la plus importante différence entre les impressions auditives, est celle qui existe entre les *bruits* et les *sons musicaux*. Le bourdonnement, le gémissement, le sifflement du vent, le murmure de l'eau, le roulement d'une voiture sur le pavé, sont des exemples de la première espèce de sensation auditive, les sons de tous les instruments de musique donnent l'exemple de la seconde espèce. Le son et le bruit peuvent, il est vrai, s'associer dans des rapports très-variables, et se confondre dans la transition de l'un à l'autre, mais les extrêmes sont très-nettement séparés.

Pour découvrir l'essence de la différence entre le son et le bruit, il suffit, dans la plupart des cas, d'une observation attentive avec le

secours de l'oreille seule, sans avoir besoin de recourir à l'emploi d'artifices particuliers pour lui venir en aide. On reconnaît ainsi, en général, que, pendant la durée d'un bruit, il se produit une rapide succession de sensations auditives différentes. Qu'on s'imagine successivement le bruit d'une voiture roulant sur le pavé, le murmure et le grondement d'une chute d'eau ou des vagues de la mer, le bruissement des feuilles dans la forêt. Ici nous avons partout une succession rapide et irrégulière, mais facilement reconnaissable, de sonorités distinctes éclatant par secousses. Dans le gémissement du vent, la succession est lente, le son se traîne lentement et monte peu à peu pour redescendre ensuite. Dans la plupart des autres bruits, la distinction des différentes sonorités qui se succèdent sans relâche, est plus ou moins bien accentuée; nous apprendrons plus tard à connaître un auxiliaire, les résonnateurs, au moyen desquels cette analyse devient beaucoup plus facile pour l'oreille.

En revanche, une sensation musicale apparaît à l'oreille comme un son parfaitement calme, uniforme et invariable; tant qu'il dure, on ne peut distinguer aucune variation dans ses parties constitutives. Il lui correspond, par conséquent, une sensation simple et d'une nature régulière, tandis que, dans un bruit, de nombreuses sensations auditives sont irrégulièrement mélangées, et se heurtent l'une à l'autre. On peut effectivement composer un bruit avec des sons, par exemple, en frappant à la fois toutes les touches d'un piano comprises dans l'étendue d'une ou deux octaves. D'après cela, il est évident que les sons musicaux constituent les éléments simples et réguliers des sensations auditives, et que c'est par eux que nous devons commencer l'étude des lois et des propriétés de ces sensations.

Nous arrivons maintenant à une autre question d'un ordre plus élevé : à quelle différence, dans l'agent extérieur, correspond, pour l'oreille, la différence entre le bruit et le son ? Il faut chercher la cause normale et habituelle des impressions de l'oreille humaine dans l'ébranlement de la masse d'air ambiante. La sensation, irrégulièrement variable, que l'oreille éprouve dans le bruit, nous amène à supposer que l'ébranlement aérien correspondant doit être aussi d'une nature irrégulière et variable, et que, par contre, les sons musicaux sont dus à un mouvement égal, régulier, qui doit lui-même trouver son origine dans les ébranlements réguliers du corps sonore dont l'atmosphère transmet les secousses.

La nature de ces ébranlements, qui donnent naissance aux sons musicaux, est depuis longtemps connue d'une manière précise, grâce aux recherches de la physique. Ce sont des *vibrations*, c'est-à-dire un mouvement de va-et-vient du corps sonore, et ces vibrations doivent être

régulières, *périodiques*. Par mouvement périodique, nous entendons celui qui, dans des périodes rigoureusement égales, repasse toujours exactement par les mêmes états. La longueur constante de la période, qui s'écoule entre les deux reproductions successives du même état de mouvement, s'appelle *durée de la vibration*, ou période du mouvement. Quant à la nature du mouvement exécuté par le corps vibrant pendant la durée d'une période, c'est ici tout à fait indifférent. Pour éclaircir, par des exemples connus, l'idée d'un mouvement périodique, je citerai le mouvement du pendule, d'une pierre assujettie, au moyen d'une corde, à décrire un cercle avec une vitesse constante, d'un marteau que le rouage d'un moulin à eau élève et laisse retomber régulièrement, à intervalles égaux. Tous ces mouvements, si différents qu'ils soient d'ailleurs, sont périodiques, dans le sens que nous venons d'attacher à ce mot. La durée de leur période qui, dans les exemples cités, atteint le plus souvent une ou plusieurs secondes, est proportionnellement longue, comparée aux périodes beaucoup plus courtes des vibrations sonores qui, partant d'au moins 30 à la seconde pour les sons les plus graves, peuvent s'élever jusqu'au nombre de plusieurs milliers par seconde dans les sons aigus.

D'après notre définition des mouvements périodiques, nous pouvons donc répondre à la question posée plus haut de la manière suivante : *la sensation du son musical est causée par des mouvements rapides et périodiques du corps sonore; la sensation du bruit, par des mouvements non périodiques.*

Les vibrations sonores des corps solides peuvent très-fréquemment être constatées par le sens de la vue. Bien qu'elles soient trop rapides, pour que nous puissions suivre de l'œil chacune d'elles isolément, il nous est cependant facile de reconnaître, à la vue d'une corde vibrante, d'un diapason, ou de la languette d'un tuyau à anche, qu'ils sont animés d'un rapide mouvement de va-et-vient entre deux positions-limites fixes. L'image régulière, et en apparence immobile, que le corps vibrant offre à l'œil, malgré son mouvement, nous fait conclure à la régularité de ses oscillations de part et d'autre de sa position d'équilibre. Dans d'autres cas, nous pouvons percevoir par le toucher les vibrations des corps solides qui résonnent. Ainsi, par exemple, l'instrumentiste sent les vibrations de l'anche, en jouant de la clarinette, du hautbois, du basson, et les vibrations de ses propres lèvres, en jouant de la trompette ou du trombone.

Les trépidations, qui se produisent dans les corps sonores, sont donc transmises à notre oreille d'abord, et, en règle générale, par l'intermédiaire de l'air. Mais les molécules d'air doivent aussi vibrer d'un mouvement périodique, pour produire, dans notre oreille, la sensa-

tion d'un son musical. C'est là, en réalité, ce qui a lieu, quoique, dans l'expérience journalière, le son apparaisse plutôt comme un agent qui s'avance dans l'atmosphère d'une manière continue, en s'étendant toujours de plus en plus loin. Mais nous devons ici faire une distinction entre le mouvement des molécules isolées, — ce va-et-vient périodique resserré entre deux limites, — et la propagation de l'ébranlement sonore; c'est ce dernier qui avance sans cesse, pendant qu'à chaque instant, de nouvelles molécules sont attirées dans le cercle d'ébranlement.

C'est là une propriété de tous les mouvements qui se produisent par ce qu'on appelle des *ondes*. Qu'on imagine une pierre jetée dans une nappe d'eau parfaitement tranquille. Autour du point ébranlé, se forme aussitôt une petite vague circulaire qui, s'avançant également dans toutes les directions, devient un cercle de plus en plus grand. C'est tout à fait à la manière de cette onde circulaire, que se propage dans l'air le son émanant d'un point vibrant; il s'avance dans toutes les directions, aussi loin que le comportent les limites de la masse d'air. La propagation dans l'atmosphère est, par essence, exactement la même que sur une nappe d'eau; la seule différence capitale est que le son, s'avançant dans toutes les directions de l'espace, se propage suivant des *sphères* de plus en plus grandes, tandis que les ondes, à la surface de l'eau, ne peuvent former que des *cercles*. Aux éminences formées par les ondes liquides correspondent, dans les ondes sonores, des couches d'air condensées, aux dépressions des couches dilatées. Sur la surface libre de l'eau, les molécules peuvent se superposer là où elles sont pressées les unes contre les autres, de là les éminences qu'elles forment. Dans l'intérieur de l'atmosphère, elles sont obligées de se condenser, n'ayant pas d'espace libre pour s'étendre.

Les ondes liquides avancent donc constamment sans jamais reculer; mais il ne faut pas s'imaginer que les molécules d'eau aient un mouvement en avant semblable à celui des ondes elles-mêmes. Nous pouvons facilement rendre sensibles les mouvements exécutés par les molécules le long de la surface liquide, en faisant flotter sur l'eau une paille. Elle suit exactement les mouvements des molécules voisines. Eh bien! cette paille ne sera pas entraînée par le cercle d'onde; elle sera seulement soulevée, puis abaissée, et restera précisément à la place où elle se trouvait en premier lieu. Il en est exactement de même des molécules d'eau. Quand le cercle d'ondes arrive sur elles, elles entrent en oscillation; quand il est passé, elles se retrouvent à leur ancienne place, et restent en repos pendant que l'onde atteint toujours de nouvelles régions qu'elle met en mouvement. Par conséquent, les ondes, qui parcourent la surface de l'eau, sont, à chaque instant, composées,

construites avec de nouvelles molécules, en sorte que, dans la marche de l'onde, c'est seulement le mouvement, le changement de forme qui s'avance sur la surface, tandis que les molécules isolées entrent en oscillation sur son passage, mais sans jamais s'écarter beaucoup de leur position première.

Le même phénomène apparaît d'une façon encore plus évidente dans le mouvement ondulatoire d'une corde ou d'une chaîne. Prenons une corde flexible de quelques pieds de long ou même une chaîne métallique ; tenons-la par un bout et laissons-la pendre, de façon qu'elle ne soit tendue que par son propre poids. Portons rapidement, de part et d'autre de la position initiale, la main qui tient l'extrémité de la corde. Le mouvement imprimé par la main à l'extrémité supérieure de la corde, la parcourra tout entière suivant une espèce d'onde, de façon que les parties inférieures subissent successivement un déplacement horizontal, tandis que les parties supérieures reprennent leur position d'équilibre. Il est pourtant évident que, tandis que l'onde se propage ainsi de haut en bas, chacune des parties de la corde ne peut qu'osciller horizontalement, mais sans participer en rien au mouvement descendant de l'onde.

L'expérience réussit encore mieux sur une corde longue, élastique, et faiblement tendue ; par exemple, sur un fort cordon de caoutchouc, ou sur une corde spirale de laiton de huit à douze pieds de long, dont un des bouts est fixé tandis qu'on tient l'autre à la main. Celle-ci peut facilement produire des ondulations qui se transmettent très-régulièrement jusqu'à l'autre extrémité de la corde, y sont réfléchies et reviennent en sens inverse. Ici encore, il est évident que ce ne sont pas les particules mêmes du cordon qui vont et viennent, mais que l'ondulation gagne successivement, dans sa marche, les différentes molécules. Ces exemples pourront donner au lecteur une idée de la nature des mouvements constitutifs du son, où les molécules matérielles exécutent seulement des vibrations périodiques autour de leur position initiale, tandis que l'ébranlement lui-même se propage sans cesse en avant.

Revenons à la nappe d'eau. Nous avons supposé qu'une pierre y tombait en un point et y déterminait un ébranlement. Ce dernier s'est propagé sur la surface liquide sous forme de cercles, il est parvenu jusqu'à la paille et l'a mise en mouvement. L'ébranlement, provoqué par la pierre en un point de la nappe d'eau, a donc été transmis par les ondes à la paille qui se trouvait en un autre point. Les choses se passent exactement de la même manière dans l'atmosphère qui nous enveloppe. Au lieu d'une pierre, c'est un corps sonore ébranlant l'air, au lieu d'une paille, c'est l'oreille humaine que viennent frapper

les ondes aériennes, et dont les parties mobiles entrent en mouvement.

Les ondes, émanant du corps sonore, transmettent l'ébranlement à l'oreille, exactement de la même manière que les ondes liquides le transmettent de la pierre à la paille.

Il sera facile, maintenant, de se rendre compte comment un corps, animé de vibrations périodiques, peut aussi communiquer aux molécules d'air un mouvement périodique. Une pierre qui tombe dans l'eau n'imprime, à la surface liquide, qu'un seul ébranlement. Mais qu'on imagine, au lieu d'une pierre, une série régulière de gouttes tombant dans l'eau par un orifice étroit. Chaque goutte déterminera la formation d'un cercle d'ondes; chaque cercle d'ondes parcourra la surface liquide tout à fait de la même manière que les précédents, et sera suivi, à son tour, de nouveaux cercles. Il se produira donc, à la surface de l'eau, une série régulière de cercles concentriques grandissant. Autant de gouttes tombant par seconde, autant d'ondes qui viendront atteindre, aussi dans une seconde, la paille flottante ; autant de fois cette dernière sera soulevée et abaissée. Elle exécutera donc un mouvement périodique, dont la période est égale à l'intervalle de temps qui sépare la chute de deux gouttes consécutives. C'est de la même manière qu'un corps sonore, vibrant périodiquement dans l'atmosphère, communique d'abord à l'air ambiant, puis, à la membrane du tympan de notre oreille, un mouvement périodique semblable, dans lequel la durée de la vibration doit être la même que pour le corps sonore.

Après avoir établi la première et fondamentale distinction du son, en bruit et en son musical, après avoir décrit, d'une manière générale, les mouvements de l'air correspondant aux sons musicaux, nous arrivons aux propriétés particulières par lesquelles les sons musicaux, à leur tour, se distinguent entre eux. On reconnaît trois différences dans les sons, si l'on se borne d'abord à les considérer tels qu'ils sont produits isolément par nos instruments de musique usuels, à l'exclusion des sons produits simultanément par des instruments différents. Les sons se distinguent entre eux :

1° Par leur *intensité;*

2° Par leur *hauteur;*

3° Par leur *timbre.*

Ce qu'on entend par *intensité* et par *hauteur* du son, je n'ai pas besoin de l'expliquer.

Par *timbre*, nous entendons cette propriété qui distingue le son d'un violon, de celui d'une flûte, d'une clarinette ou d'une voix humaine, donnant les mêmes notes à la même hauteur. Nous avons

maintenant à rechercher, pour ces trois différences capitales, quelles sont les particularités correspondantes du mouvement sonore.

D'abord, pour l'intensité, il est facile de reconnaître qu'elle croît et décroît avec l'amplitude des vibrations du corps sonore. Si nous frappons une corde d'instrument, les vibrations sont, au commencement, assez amples pour qu'on puisse les voir ; et c'est aussi au commencement que le son est le plus fort. Puis les vibrations visibles diminuent dans le même rapport que l'intensité. Nous pouvons faire la même observation sur les cordes ébranlées par l'archet, sur les languettes des tuyaux et sur beaucoup d'autres corps sonores. Nous devons tirer la même conséquence de ce fait que, lorsqu'en plein air nous nous éloignons du corps vibrant, l'intensité diminue sans que la hauteur ou le timbre soient changés.

L'éloignement ne modifie dans les ondes aériennes que l'amplitude des vibrations des molécules isolées ; il doit agir, par conséquent, sur l'intensité du son, mais sur aucune des autres propriétés (1).

La seconde différence essentielle des divers sons réside dans leur *hauteur*. Nous savons déjà, par l'expérience journalière, qu'on peut tirer des sons de même hauteur des instruments les plus divers, au moyen des combinaisons mécaniques les plus variées, et en donnant à l'intensité les valeurs les plus différentes. Les mouvements de l'air correspondant aux diverses sonorités, doivent être tous périodiques ; autrement ils ne procureraient point à l'oreille la sensation d'un son musical. Dans l'intervalle de chaque période, le mouvement peut être d'une nature quelconque ; il suffit que la durée de la période soit la même pour que les deux sons aient la même hauteur. Donc : *la hauteur dépend seulement de la durée de la vibration*, ou, ce qui revient au même, *du nombre de vibrations*. On prend ordinairement la seconde pour unité de temps ; on entend donc par *nombre de vibrations*, le nombre de vibrations exécutées par le corps sonore pendant une seconde. Il va de soi qu'on trouve la durée de la vibration, en divisant la seconde par le nombre de vibrations exécutées. *La hauteur des sons est donc d'autant plus grande, que le nombre des vibrations est plus considérable, ou que la durée de la vibration est moindre.*

Il est assez difficile de déterminer exactement le nombre de vibrations exécutées par les corps élastiques qui donnent des sons perceptibles ; aussi les physiciens ont-ils dû recourir à de nombreuses mé-

(1) Mécaniquement, l'intensité des vibrations, pour des sons de différentes hauteurs, est proportionnelle à la force vive, c'est-à-dire au carré de la plus grande vitesse des molécules vibrantes. Mais l'oreille a une sensibilité différente pour les sons de différentes hauteurs, en sorte qu'on ne peut arriver ainsi au véritable rapport (pour les différentes hauteurs) entre l'intensité et la sensation.

thodes, relativement compliquées, pour pouvoir résoudre la question dans chaque cas particulier. Les théories mathématiques et des expériences de tout genre ont dû se prêter un mutuel appui.

Pour exposer les faits fondamentaux de cette partie de la science musicale, il est très-commode de pouvoir recourir à un instrument particulier appelé *Sirène*, construit de manière à permettre de déterminer directement, le nombre des vibrations aériennes qui donnent naissance au son. La figure 1 reproduit la plus simple de toutes les sirènes, celle de Seebeck, réduite à ses parties essentielles. A est un disque mince de carton ou de fer-blanc, qu'on peut faire tourner rapidement autour de son axe central *b*, au moyen de la corde sans fin *ff*, enroulée sur une roue d'un plus grand diamètre. Sur tout le bord, le disque est percé d'une série de trous à égale distance les uns des autres, au nombre de douze; une ou plusieurs autres séries de trous équidistants se trouvent placées sur d'autres cercles concentriques au premier (la figure 1 porte un second cercle de huit trous); *c* est un petit tube dressé contre un des trous. Faisons maintenant tourner rapidement le disque, et soufflons dans le petit tube *c*; l'air pourra sortir librement toutes les fois qu'un des trous coïncidera avec l'orifice du tube; le gaz sera, au contraire, arrêté dans sa marche, toutes les fois qu'une partie pleine du disque se trouvera devant cet orifice. Il en résulte qu'à chaque passage d'un trou devant l'extrémité du tube, il se produit une secousse dans l'air. Pour un seul tour du disque, le tube étant placé sur le cercle extérieur, nous avons donc douze impulsions aériennes correspondant aux douze trous; si le tube était sur le cercle intérieur, il n'y aurait que huit impulsions. Si le disque fait dix tours à la seconde, le cercle extérieur nous donne, dans le même temps, cent vingt impulsions qui produisent un son faible et bas; le cercle intérieur en donne quatre-vingts. D'une manière générale, si nous connaissons le nombre de tours exécutés par le disque en une seconde, et le nombre des trous sur le cercle en contact avec le tube, le produit donne évidemment le nombre des impulsions aériennes. Ce nombre est donc bien plus facile à obtenir exactement qu'avec n'importe quel autre appareil sonore; aussi les sirènes sont-elles extraordinairement commodes, pour étudier les modifications du son qui dé-

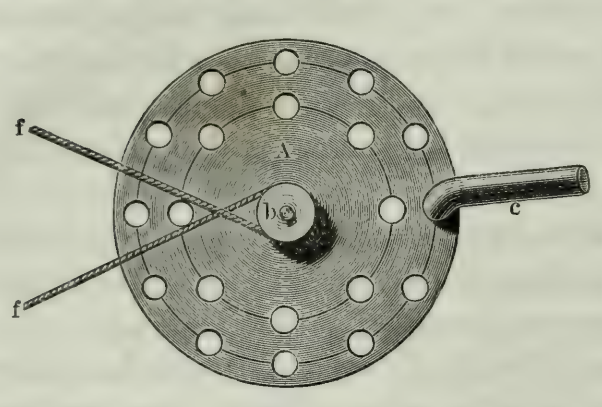


Fig. 1.

pendent des modifications et des rapports des nombres de vibrations.

La sirène qui vient d'être décrite ne donne qu'un son faible ; si j'en ai parlé en premier lieu, c'est que son mécanisme est le plus facile à saisir ; elle peut aussi, par le changement du disque, se prêter à des expériences très-variées. On obtient un son plus fort avec la sirène de Cagnard-Latour, décrite dans les figures 2, 3, 4. SS est le disque

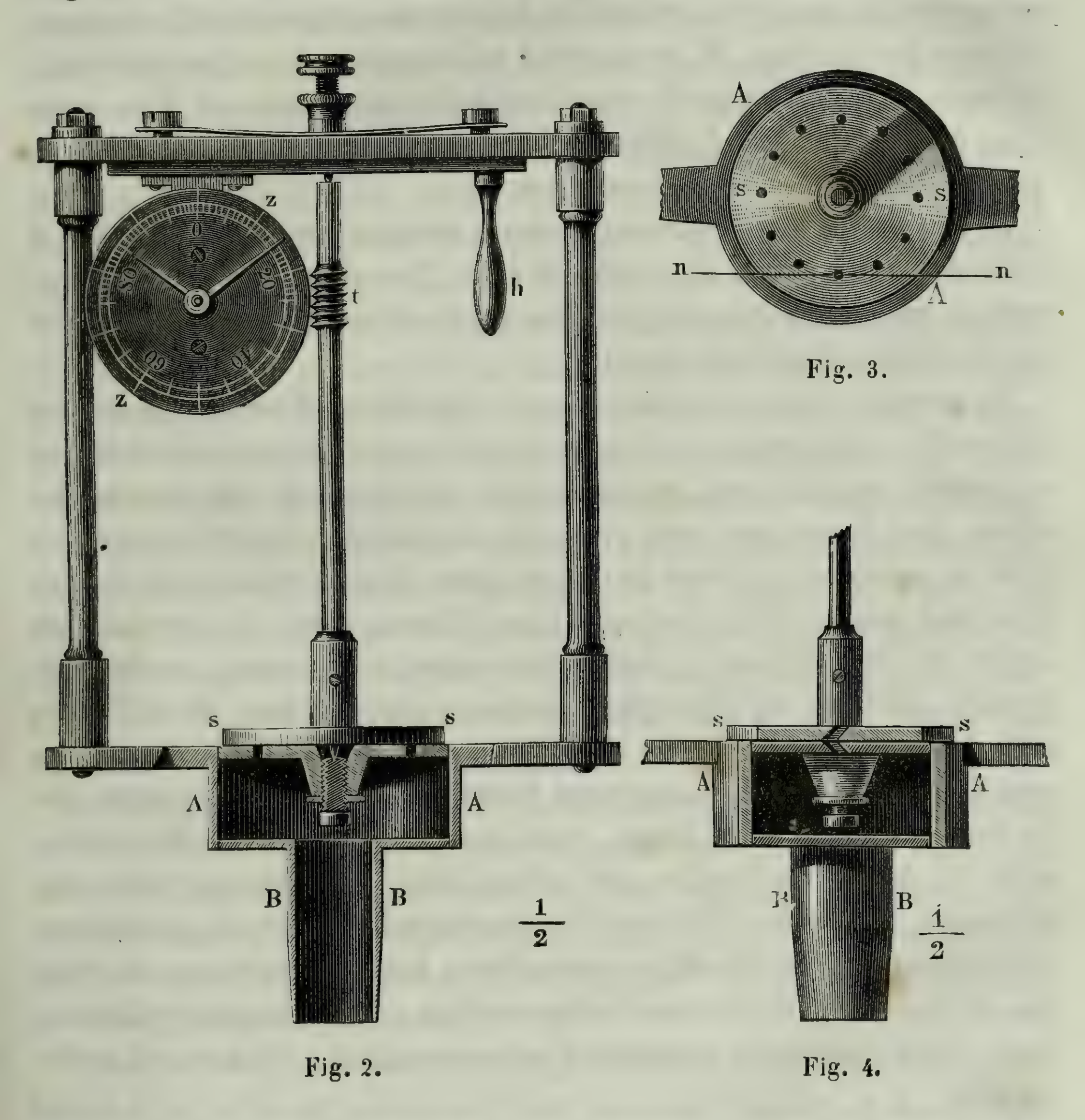


Fig. 3.

Fig. 2.

Fig. 4.

tournant, vu d'en haut dans la figure 3, et de côté dans les figures 2 et 4. Il est monté sur une caisse à vent A, qui peut être mise en communication par le tube B avec une soufflerie. Le couvercle de la caisse A, qui est en contact immédiat avec la partie inférieure du disque tournant, présente un nombre égal d'ouvertures ; les trous de ce couvercle et ceux du disque ont des directions faisant entre elles un certain angle, comme le montre la figure 4 (la figure 4 est une coupe de l'instrument suivant la ligne *nn* de la figure 3). Il résulte de cette disposition des trous, que le vent qui s'échappe imprime au disque SS un mouvement de rotation, et qu'on peut obtenir, en soufflant suffi-

samment fort, de 50 à 60 tours par seconde. Comme tous les trous de cette sirène sont traversés en même temps par le vent, on obtient un son beaucoup plus fort qu'avec la sirène de Seebeck. Pour déterminer le nombre de tours, il y a le compteur *rr* fixé sur une roue dentée qui engrène avec la vis *t*, et qui, à chaque tour du disque SS, avance d'une dent. Au moyen de la poignée *h*, on peut déplacer un peu le compteur, de manière à établir ou à interrompre à volonté la communication avec la vis *t*. Si on engrène au moment où un pendule bat la seconde, et qu'on sépare le compteur de la vis au moment d'un autre coup du pendule, les aiguilles indiquent combien le disque a fait de tours pendant les secondes comptées (1).

Dove a donné à cette sirène plusieurs séries de trous, qui peuvent, à volonté, laisser passer ou arrêter le vent. Une sirène polyphone, présentant encore d'autres dispositions particulières, sera représentée et décrite dans le huitième chapitre.

En premier lieu, il est évident que, si le disque d'une de ces sirènes tourne d'un mouvement uniforme, et que le vent s'échappe par secousses en passant par les trous, le mouvement résultant de l'air sera *périodique*, dans le sens que nous avons attaché à ce mot. Les trous équidistants se succèdent au bout de temps égaux dans la rotation. A chaque trou, une bouffée d'air s'échappe dans l'atmosphère, et y produit des ondes qui se succèdent à intervalles égaux, exactement comme les gouttes tombant régulièrement dans une nappe d'eau. Dans l'intervalle de chaque période, les dispositions différentes des sirènes peuvent donner à l'air un mouvement d'une nature différente, selon que les trous sont étroits ou larges, voisins ou éloignés les uns des autres, selon la forme de l'orifice des tubes, mais, en tout cas, toutes les secousses, imprimées à l'air par le même nombre de trous, produiront un mouvement régulièrement périodique, tant que la vitesse de rotation et la position du tube ne changeront pas ; ces secousses éveilleront donc, dans l'oreille, la sensation d'un son musical ; c'est ce qui arrive en effet.

Des expériences faites avec l'aide des sirènes, on arrive aisément à conclure que deux séries présentant le même nombre de trous, et tour-

(1) Je suis arrivé récemment à imprimer à une sirène une rotation régulière et constante au moyen d'une petite machine électro-magnétique, dans laquelle le courant électrique est interrompu par la force centrifuge d'un poids, dès que la vitesse de rotation commence à dépasser une certaine valeur. La vitesse de la machine s'accroît donc jusqu'à cette limite, mais ne peut jamais la franchir. On n'a pas besoin de monter la sirène sur une soufflerie ; au disque est adaptée une sorte de petite turbine qui pousse l'air dans la caisse à travers les trous. Grâce à cette disposition, la sirène donne des sons d'une hauteur extraordinairement constante, à tel point qu'elle peut rivaliser sous ce rapport avec les tuyaux d'orgue les mieux construits.

nant avec la même vitesse, donnent un son de même hauteur, quelles que puissent être la grandeur et la forme des trous et du tube. On peut même obtenir un son de même hauteur, en remplaçant l'air par une pointe, qui vient frapper les trous pendant la rotation du disque. Il s'ensuit donc d'abord, que la hauteur d'un son musical dépend uniquement du nombre des secousses aériennes ou vibrations, et non de leur forme, de leur intensité, ou de la nature de leur mouvement. Ensuite, il est très-facile de voir, au moyen de cet instrument, que si on augmente la vitesse de rotation du disque, et, par suite, le nombre d'impulsions aériennes, le son monte. Il en est de même, si, tout en conservant la même vitesse, on prend d'abord une série d'un certain nombre de trous, puis une autre présentant un nombre plus considérable. Le son est plus élevé dans ce dernier cas.

Avec le même instrument, on trouve aussi très-facilement la relation remarquable, que présentent les nombres de vibrations de deux sons qui forment entre eux un intervalle consonnant. Prenons sur un disque une série de huit trous, une autre de seize; faisons arriver l'air alternativement dans chacune d'elles, en conservant au disque sa vitesse de rotation. On entendra deux sons qui seront entre eux précisément dans le rapport d'une octave. Augmentons la vitesse du disque; les deux sons monteront tous deux, mais de manière à former encore une octave dans leurs nouvelles positions. Nous déduirons de là, qu'un *son, à l'octave supérieure d'un autre, exécute, dans le même temps, un nombre de vibrations précisément double.*

Le disque représenté plus haut, dans la figure 1, présente deux séries de huit et douze trous. En soufflant successivement dans les deux, on obtiendra deux sons formant entre eux une quinte juste, quelle que soit la vitesse du disque autour de son axe. Il suit de là, que *deux sons forment une quinte, lorsque le plus élevé fait trois vibrations pendant que le plus grave en fait deux.*

Étant donné un son produit par la série de huit trous, nous avons besoin de la série de seize trous pour en avoir l'octave, et de celle de douze pour en avoir la quinte. Les nombres de vibrations de la quinte et de l'octave sont donc entre eux comme douze est à seize, ou comme trois est à quatre. Mais l'intervalle entre la quinte et l'octave est une quarte; nous voyons donc que deux sons forment une quarte, si le plus élevé fait quatre vibrations pendant que le plus grave en fait trois.

La sirène polyphone de Dove présente ordinairement quatre séries de huit, dix, douze, seize trous. La série de seize trous donne l'octave de celle de huit, et la quarte de celle de douze; la série de douze trous donne la quinte de celle de huit, et la tierce majeure de celle de dix; cette dernière donne la tierce majeure de la série de huit trous.

Les quatre séries donnent donc les sons d'un accord parfait majeur.

Ces expériences et d'autres semblables, donnent les rapports suivants entre les nombres de vibrations :

1 : 2 = octave,
2 : 3 = quinte,
3 : 4 = quarte,
4 : 5 = tierce majeure,
5 : 6 = tierce mineure.

Si on élève d'une octave le son fondamental d'un intervalle donné, on a ce qu'on appelle l'intervalle *renversé*. Ainsi la quarte est une quinte renversée, la sixte mineure une tierce majeure renversée, la sixte majeure une tierce mineure renversée. D'après cela, le rapport de vibrations correspondant s'obtient en doublant le plus petit nombre de l'intervalle primitif :

Le rapport de	2 : 3	donne	la quinte,
—	3 : 4	—	la quarte,
—	4 : 5	—	la tierce majeure,
—	5 : 8	—	la sixte mineure,
—	5 : 6	—	la tierce mineure,
—	6 : 10 ou 3 : 5,		la sixte majeure.

Ce sont là tous les intervalles consonnants compris dans une octave. Les rapports de vibrations correspondants sont tous formés par les nombres entiers de un à six, à l'exception de la sixte mineure, qui est, en réalité, la plus imparfaite de ces consonnances.

Ainsi, au moyen des sirènes, par des expériences relativement simples et faciles, se trouve encore confirmée la loi remarquable dont nous avons parlé dans l'Introduction, et d'après laquelle, les nombres de vibrations des sons formant des intervalles consonnants, sont dans le rapport des plus petits nombres entiers. Dans la suite de nos recherches, nous aurons recours au même instrument pour prouver, d'une manière encore plus approfondie, la précision et l'exactitude de cette loi.

Longtemps avant qu'on sût quoi que ce soit des nombres de vibrations et de leur mesure, Pythagore avait découvert que, pour partager la longueur d'une corde au moyen d'un chevalet, de manière à faire rendre aux deux parties les sons d'un intervalle consonnant, il faut la diviser proportionnellement aux nombres entiers dont il est question plus haut. Si on place le chevalet de manière à laisser à sa droite les deux tiers de la corde et à sa gauche seulement le tiers, les deux longueurs seront entre elles dans le rapport de 2 : 1, et donneront l'inter-

valle d'une octave, la plus grande longueur correspondant au son le plus bas. Le chevalet laisse-t-il à droite les 3/5, à gauche les 2/5 de la longueur totale, le rapport des deux parties est 3 : 2, et les sons forment une quinte.

Ces déterminations ont été exécutées par les musiciens grecs avec une précision déjà grande, et ils avaient fondé là-dessus un système musical assez compliqué. Pour faire ces mesures, on employait un instrument particulier, le *monocorde*, formé d'une seule corde tendue sur une caisse résonnante, et au-dessous de laquelle se trouvait une échelle divisée pour pouvoir placer exactement le chevalet.

Ce ne fut que beaucoup plus tard, grâce aux recherches de Galilée (1638), Newton, Euler (1729) et Daniel Bernouilli (1771), qu'on apprit à connaître les lois du mouvement des cordes, et qu'on découvrit, que les rapports simples des longueurs étaient en même temps les rapports inverses des nombres de vibrations des sons; qu'ils s'appliquaient, par conséquent, aux intervalles de tous les instruments de musique, et non pas seulement à ceux des cordes vibrantes, pour lesquelles la loi avait été découverte dans l'origine.

Cette relation entre les nombres entiers et les consonnances musicales, a été considérée de tout temps comme un admirable et important mystère. Déjà les Pythagoriciens la rangeaient dans leurs spéculations sur l'harmonie des sphères. Elle resta depuis lors tantôt la fin, tantôt le point de départ de suppositions singulières et hardies, fantastiques ou philosophiques, jusqu'aux temps modernes, où les savants adoptèrent, pour la plupart, l'opinion, déjà émise par Euler, que l'âme humaine trouvait un bien-être particulier dans les rapports simples, parce qu'elle pouvait plus facilement les embrasser et les saisir. Mais il restait à examiner, comment l'âme d'un auditeur entièrement étranger à la physique, et qui ne s'est peut-être jamais rendu compte que les sons proviennent de vibrations, peut arriver à reconnaître et à comparer les rapports des nombres de vibrations. Déterminer les phénomènes qui rendent sensible à l'oreille la différence entre les consonnances et les dissonnances, sera une des questions principales de la seconde partie de ce livre.

CALCUL DES NOMBRES DE VIBRATIONS POUR TOUS LES SONS DE LA GAMME.

Les rapports numériques déjà établis, entre les nombres de vibrations des intervalles consonnants, permettent d'arriver facilement à une détermination analogue pour toute l'étendue de la gamme, en suivant la série des intervalles consonnants, dans l'ordre même de la gamme.

L'accord parfait majeur se compose d'une tierce majeure et d'une quinte. Ses rapports sont :

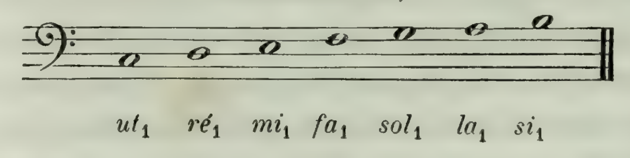
ut	:	*mi*	:	*sol*
1	:	$\frac{5}{4}$	:	$\frac{3}{2}$
4	:	5	:	6

Si nous ajoutons à cet accord celui de la dominante *sol : si : ré*, et de la sous-dominante *fa : la : ut*, qui ont tous deux un son commun avec l'accord de la tonique, nous obtenons tous les sons de la gamme d'*ut* majeur et les rapports suivants :

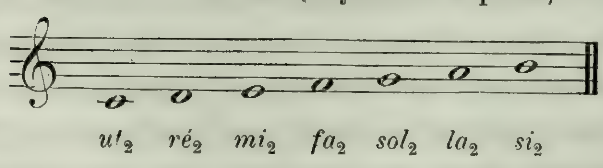
ut	:	*ré*	:	*mi*	:	*fa*	:	*sol*	:	*la*	:	*si*	:	*ut*
1	:	$\frac{9}{8}$	:	$\frac{5}{4}$	:	$\frac{4}{3}$	:	$\frac{3}{2}$	:	$\frac{5}{3}$	:	$\frac{15}{8}$	:	2

Pour pouvoir continuer le calcul sur les autres octaves, nous ferons d'abord les remarques suivantes sur la désignation des sons. Les musiciens français désignent les sons des octaves plus élevées au moyen d'une accentuation particulière, ainsi qu'il suit :

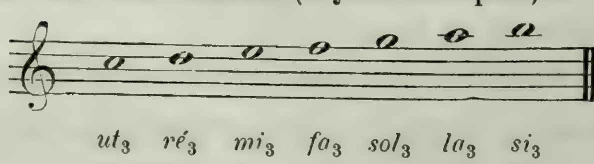
1. Octave prime ou petite octave (tuyaux d'orgue de 4 pieds pour la fondamentale) :



2. Octave seconde (tuyaux de 2 pieds) :

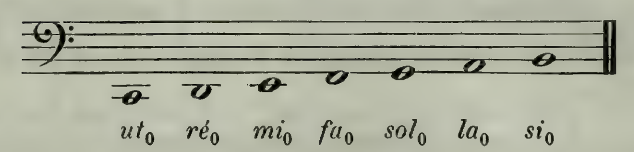


3. Octave tierce (tuyaux de 1 pied) :



On continue d'après le même principe pour les octaves plus élevées. Au-dessous de la petite octave, se trouve la grande octave non accentuée, dont l'*ut* est donné par un tuyau ouvert de 8 pieds ; d'où le nom d'octave de 8 pieds :

4. Grande octave (tuyaux de 8 pieds) :



Immédiatement au-dessous vient la contre-octave (tuyau de 16 pieds), la plus basse du piano et de la plupart des orgues, dont les sons sont désignés par ut_1, $ré_1$, mi_1, fa_1, sol_1, la_1, si_1. Enfin, sur le grandes orgues, se trouve une dernière octave (tuyau de 32 pieds) de ut_{-2} à si_{-2}, mais dont les notes conservent à peine le caractère d'un son musical (1).

Comme les nombres de vibrations d'une octave sont toujours doubles de ceux de l'octave immédiatement inférieure, on obtiendra les nombres correspondant aux sons aigus, en *multipliant* ceux de l'octave de 8 pieds par autant de fois 2, qu'il y a d'unités dans l'indice positif; pour les octaves graves, on *divisera* les nombres de l'octave de 8 pieds, par autant de fois 2 qu'il y a d'unités dans l'indice négatif.

$$\text{Ainsi} \qquad ut_3 = 2 \times 2 \times 2 \times ut_0.$$
$$ut_{-2} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times ut_0.$$

Pour la hauteur des sons de la gamme musicale, les physiciens allemands suivent, en général, la détermination de Scheibler adoptée par le congrès de savants allemands de 1834, et d'après laquelle le *la* (*la* du diapason) exécute 440 vibrations par seconde (2).

On en déduit, pour la gamme d'*ut* majeur, le tableau suivant, pouvant servir à déterminer la hauteur des sons qui, dans la suite de cet ouvrage, seront définis par le nombre de leurs vibrations :

(1) Ce système de notation se rapproche à peu près autant que possible du système de notation allemande.

c, d, e, f, g, a, h	c', d', e', f', g', a', h', c'', etc.
ut_1, $ré_1$, mi_1, fa_1, sol_1, la_1, si_1	ut_2, $ré_2$, mi_2, fa_2, sol_2, la_2, si_2, ut_3, etc.
C, D, E, F, G, A, H	C_1, D_1, etc., indices positifs.
ut_0, $ré_0$, mi_0, fa_0, sol_0, la_0, si_0	ut_{-1}, $ré_{-1}$, etc., indices négatifs.

(2) Dernièrement, l'Académie de Paris a adopté pour le même son, le nombre de 437,5 vibrations D'après la manière de compter en France, on dit que le la_1 exécute 875 vibrations, parce que les physiciens français considèrent à tort, comme formant une vibration simple, le déplacement du corps sonore d'un côté seulement de sa position d'équilibre nous conservons la manière de compter usitée en Allemagne, parce que la notation française entraîne certaines difficultés, dès qu'on n'a plus affaire à la vibration simple.

NOTES.	CONTRE-OCTAVE ut_{-1} — si_{-1}	OCTAVE DE 8 PIEDS. ut_0 — si_0	OCTAVE DE 4 PIEDS. ut_1 — si_1	OCTAVE DE 2 PIEDS. ut_2 — si_2	OCTAVE DE 1 PIED ut_3 — si_3	OCTAVE DE $\frac{1}{2}$ PIED. ut_4 — si_4	OCTAVE DE $\frac{1}{4}$ PIED. ut_5 — si_5
ut	33	66	132	264	528	1056	2112
ré	37,125	74,25	148,5	297	594	1188	2376
mi	41,25	82,5	165	330	660	1320	2640
fa	44	88	176	352	704	1408	2816
sol	49,50	99	198	396	792	1584	3168
la	55	110	220	440	880	1760	3520
si	61,875	123,75	247,5	495	990	1980	3960

Le son le plus bas des instruments d'orchestre est le mi_{-1} de la contre-basse (40^{v}, 25). Les nouveaux pianos et les orgues vont généralement jusqu'à l'ut_{-1} de 33 vibrations ; les nouveaux pianos à queue donnent même le la_{-2} avec 27^{v},50. Sur les grandes orgues, on descend encore une octave plus bas, jusqu'à l'ut_{-2} avec 16, 5 vibrations, comme on l'a déjà dit. Mais le caractère musical de tous ces sons au-dessous du mi_{-1}, est à peine sensible, car nous touchons ici aux limites où s'arrête la faculté que possède l'oreille, de réunir les vibrations en un seul son. Aussi ces dernières notes graves ne peuvent-elles être employées en musique qu'associées à leurs octaves supérieures, auxquelles elles ajoutent le caractère de leur gravité, en laissant encore appréciable la hauteur du son.

Dans le haut, les pianos vont généralement jusqu'au la_5, et même à l'ut_6 de 3520 et 4224 vibrations. Le son le plus aigu de l'orchestre pourrait être le $ré_6$ de la petite flûte, avec 4752 vibrations. Avec de petits diapasons qu'il ébranlait au moyen d'un archet, Despretz a pu atteindre jusqu'au $ré_9$ auquel correspondent 38016 vibrations. Ces sons aigus produisent une sensation désagréable et pénible, et on ne distingue que très-imparfaitement les sons à cette hauteur, qui dépasse les limites de l'échelle musicale.

Les sons d'un bon emploi en musique, et dont la hauteur peut être appréciée d'une manière précise, sont donc compris entre 40 et 4000 vibrations, dans une étendue de 7 octaves ; ceux qui peuvent être perçus d'une manière générale, sont renfermés peut-être entre 16 et 38000 vibrations, dans un espace d'environ 11 octaves. On voit par là dans quelle étendue considérable l'oreille peut percevoir et distinguer les différentes valeurs des nombres de vibrations. L'oreille est,

en cela, extraordinairement supérieure à l'œil qui distingue aussi la différence des couleurs, par la durée différente des vibrations lumineuses, mais dont la sphère de sensibilité ne dépasse guère une octave.

L'*intensité* et la *hauteur* étaient les deux premiers caractères distinctifs que nous trouvions pour les différents sons ; le troisième est le *timbre* que nous avons maintenant à étudier. Quand on entend la même note donnée par un piano, un violon, une clarinette, un hautbois, une trompette, ou par la voix humaine, les sons de tous ces instruments sont différents, quoique de même intensité et de même hauteur, et nous pouvons très-facilement reconnaître au moyen de chacun d'eux l'instrument qui l'a produit.

Les variétés de timbres paraissent être en nombre infini, si on considère d'abord, que nous avons déjà une longue série d'instruments divers pouvant donner la même note, que les différents exemplaires d'un même instrument, et les voix de différents individus accusent encore dans le timbre certaines nuances plus délicates également appréciées par l'oreille ; quelquefois même la même note peut être donnée par le même instrument, avec de nombreuses modifications dans le timbre. De tous les instruments de musique, les instruments à archet sont les plus remarquables sous ce rapport. La voix humaine est encore plus riche, et le langage humain a précisément recours à ces modifications de timbre pour caractériser les différentes lettres. Continuellement, les sons musicaux de la voix sont employés surtout à l'émission des voyelles, tandis que les consonnes consistent principalement en bruits de courte durée.

Quant à la question de savoir à quelles différences physiques extérieures des ondes sonores, correspondent les différents timbres, nous avons déjà vu, qu'à l'amplitude de la vibration correspondait l'intensité, et à la durée de la vibration, la hauteur. Le timbre ne peut pas dépendre de ces deux éléments. La seule hypothèse, restant possible, est que le timbre dépende de l'espèce et de la nature du mouvement, dans l'intervalle de la période de chaque vibration isolée. Pour la production d'un son musical, nous l'avons vu, le mouvement du corps sonore doit être seulement périodique, c'est-à-dire, exactement semblable dans chaque période de vibration, à ce qu'il était dans la période précédente. Quant à la nature du mouvement dans chaque période, elle était restée tout à fait indifférente, si bien que, sous ce rapport encore, les variétés de mouvement sonore sont en nombre infini.

Prenons des exemples, et, pour commencer, des mouvements périodiques assez lents pour pouvoir être suivis de l'œil. Prenons d'abord un pendule comme nous pouvons toujours nous en faire un,

en suspendant un corps pesant au bout d'une corde et le mettant en mouvement. Le pendule oscille, de droite à gauche, d'un mouvement régulier, continu, sans secousse aucune; dans le voisinage des deux extrémités de sa course il va lentement; au milieu il va vite. Parmi les corps sonores qui ont le même mouvement, mais beaucoup plus rapide, on pourrait citer les diapasons. Qu'on frappe un diapason, ou qu'on l'ébranle par le frottement d'un archet, et qu'on l'abandonne à lui-même, ses branches oscilleront exactement de la même manière et suivant les mêmes lois qu'un pendule, avec cette différence seulement, qu'elles exécuteront plusieurs centaines d'oscillations, pendant que le pendule en fera une seule.

Comme autre exemple de mouvement périodique, on peut prendre le marteau mis en mouvement par une roue de moulin à eau. Il est soulevé lentement par la roue, puis, abandonné à lui-même, retombe tout à coup; il s'élève de nouveau lentement, et ainsi de suite. Nous avons encore ici affaire à un va-et-vient périodique, mais il est évident que le mouvement est d'une nature tout autre que celui du pendule. Parmi les mouvements sonores, celui qui s'approcherait le plus de ce cas, serait le mouvement d'une corde de violon ébranlée par l'archet, que nous décrirons plus exactement dans le cinquième chapitre. La corde adhère longtemps à l'archet, est entraînée par lui, jusqu'à ce qu'elle se détache brusquement, comme le marteau de la roue, et, comme lui encore, revient un peu en arrière avec une vitesse beaucoup plus grande qu'elle n'était venue; puis elle est reprise et entraînée de nouveau par l'archet.

Imaginons enfin une balle élastique, lancée verticalement en l'air, puis renvoyée d'un coup au moment où elle retombe, de manière qu'elle remonte à la même hauteur, et cela dans des temps toujours égaux. Cette balle mettra autant de temps à monter qu'à descendre, son mouvement sera brusquement interrompu au point le plus bas de sa course; mais, en haut, sa vitesse ascensionnelle, progressivement décroissante, devient une vitesse descendante, progressivement croissante. Ce serait là une troisième espèce de va-et-vient périodique, mais essentiellement différente des deux autres.

Pour rendre la loi de semblables mouvements plus sensible à l'œil, qu'on ne pourrait le faire avec de longues descriptions, les mathématiciens et les physiciens ont généralement recours à une méthode graphique, que nous serons obligés d'employer encore souvent, et dont je dois, par conséquent, expliquer l'esprit.

Pour faire comprendre cette méthode, imaginons un petit crayon *g* fixé sur le diapason A (*fig.* 5), et pouvant marquer sur la feuille de papier BB. Supposons que le diapason soit entraîné sur le papier avec

une vitesse constante, dans le sens de la flèche supérieure, ou que le papier se meuve sous le diapason en sens inverse, celui de la flèche inférieure, en sorte que le diapason décrive, quand il ne résonne pas, la ligne ponctuée *dc*. Donnons maintenant le même mouvement relatif au diapason, mais en faisant vibrer ses branches ; il décrira sur le

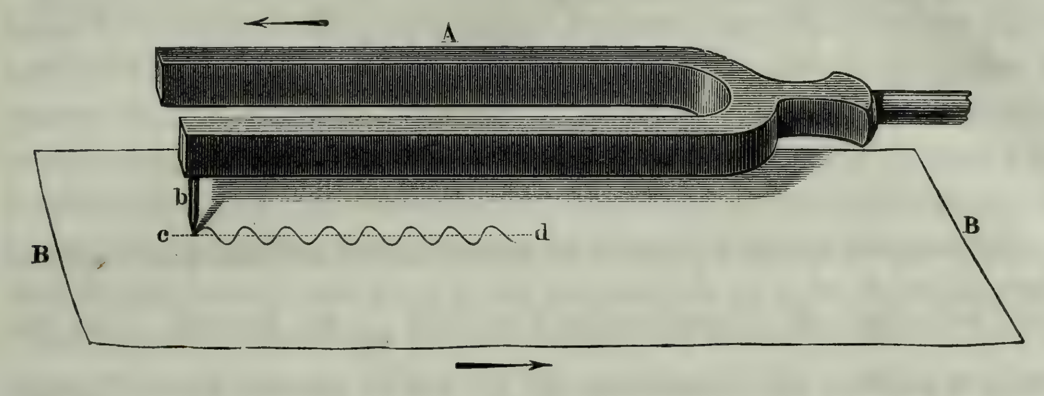


Fig. 5.

papier la ligne sinueuse *dc*. L'extrémité de la branche ainsi que le petit crayon auront un mouvement de va-et-vient, et seront, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre de la ligne ponctuée *cd*, comme le montre la ligne sinueuse décrite. Cette dernière ligne, dessinée sur le papier, représente l'espèce de mouvement exécuté par l'extrémité de la branche mise en vibrations. Comme le crayon *b* s'avance avec une vitesse constante, dans le sens de la droite *cd*, les parties égales interceptées sur cette ligne correspondent à des périodes égales, et la distance de la ligne sinueuse, de part et d'autre de la droite *cd*, indique de combien, pendant ces périodes égales, le crayon *b* a été dévié de part et d'autre de sa position d'équilibre.

Si on veut réaliser l'expérience expliquée ici, ce qu'il y a de mieux à faire, c'est de tendre le papier sur un cylindre, auquel un mouvement d'horlogerie imprime une rotation uniforme. On humecte le papier, et on le fait passer sur une flamme de térébenthine, de manière à le couvrir de noir de fumée; on peut alors facilement y tracer des traits déliés avec une pointe d'acier fine, un peu arrondie. La figure 6

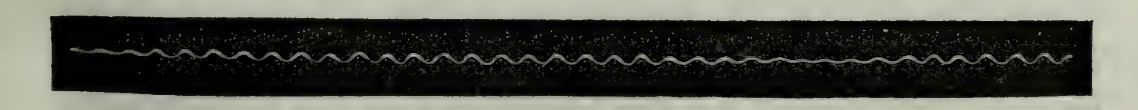


Fig. 6.

est la copie d'un dessin, exécuté de cette manière par un diapason, sur le cylindre tournant du phonautographe de MM. Scott et König.

La figure 7 représente une portion de cette courbe, à une grande échelle. Il est facile d'en comprendre la signification.

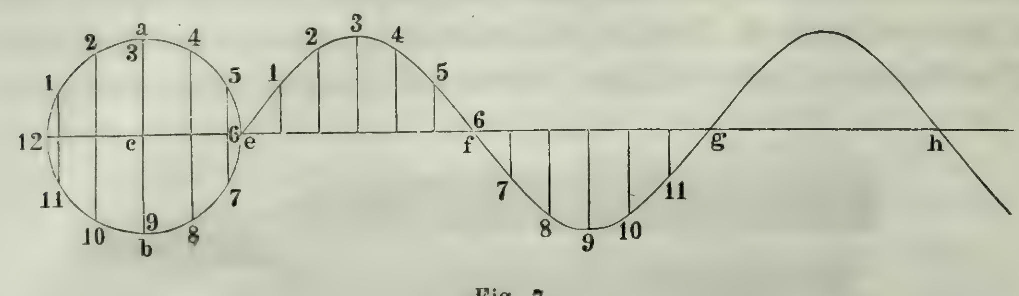


Fig. 7.

La pointe traçante a glissé d'un mouvement uniforme dans la direction de la ligne *eh*. Admettons qu'il ait fallu $\frac{1}{10}$ de seconde pour décrire la portion *eg;* partageons *eg* en douze parties égales, comme dans le dessin; pour parcourir une de ces divisions dans le sens horizontal, la pointe mettra $\frac{1}{120}$ de seconde; la courbe nous montre de quel côté, et à quelle distance de la position d'équilibre, se trouvera la pointe mise en vibrations, après $\frac{1}{120}$, $\frac{2}{120}$, etc., de seconde, et, généralement, après un temps aussi court que l'on voudra, compté à partir de l'instant où elle coïncidait avec le point *e*. Nous voyons qu'au bout de $\frac{1}{120}$ de seconde, elle s'est élevée de la hauteur 1 : qu'elle s'éloigne pendant $\frac{3}{120}$ de seconde, puis se rapproche de sa position d'équilibre, qu'elle y revient au bout de $\frac{6}{120}$ de seconde, puis passe de l'autre côté de la ligne *eh*, etc. Nous pouvons aussi déterminer facilement la position de la pointe, au bout d'une fraction quelconque de ce $\frac{1}{120}$ de seconde. Un dessin de ce genre fait donc connaître immédiatement, à quel point de sa course se trouve le corps vibrant à un moment quelconque, et, par conséquent, donne la représentation complète du mouvement. Si le lecteur veut se représenter le mouvement du point vibrant, il n'a qu'à pratiquer dans une feuille de papier une fente verticale étroite. Qu'il place le papier sur la figure 6 ou 7, de façon à ne voir, à travers la fente, qu'une petite partie de la courbe; qu'il fasse ensuite lentement glisser le livre sous le papier, et il verra le point noir ou blanc se mouvoir dans la fente, plus lentement, mais de la même manière que le diapason.

Nous ne pouvons pas, il est vrai, faire ainsi *écrire* directement les vibrations sur le papier par tous les corps sonores, quoique cette méthode ait fait récemment de grands progrès. Mais nous pouvons toujours tracer les courbes représentatives du mouvement, lorsque nous connaissons la loi de ce mouvement, c'est-à-dire lorsque nous savons à quelle distance de sa position initiale, se trouve le point vibrant au bout d'un temps donné quelconque. Portons, en effet, sur une ligne horizontale (comme *ef*, fig. 7), des longueurs qui représentent le temps, et, verticalement, de part et d'autre de cette ligne, des longueurs égales ou proportionnelles aux distances du point vibrant à sa position médiane. En réunissant les extrémités de ces dernières lignes par un trait continu, nous aurons la courbe telle qu'elle aurait été décrite par le corps sonore, s'il eût été possible de la lui faire décrire.

La figure 8 représente le mouvement du marteau soulevé par la roue hydraulique, ou du point de la corde de violon entraînée par l'archet, s'élevant progressivement les neuf premiers dixièmes du temps représenté par 0 — 10, et s'abaissant tout d'un coup brusquement dans le dernier dixième.

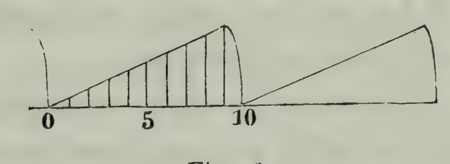


Fig. 8.

La figure 9 représente le mouvement de la balle, qui est renvoyée en haut au moment où elle arrive en bas. Elle monte et descend avec la même vitesse, tandis que, dans la figure 8, l'ascension se faisait plus lentement. Seulement, au point le plus bas de la course, le mouvement est brusquement modifié par le coup donné à la balle.

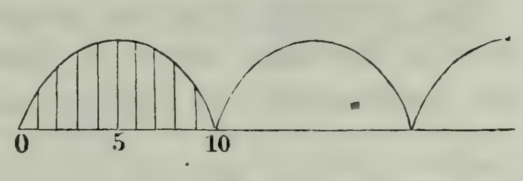


Fig. 9.

Quand les physiciens ont ainsi déterminé la signification de ces courbes qui donnent la loi du mouvement des corps sonores, ils parlent de la *forme de la vibration* d'un corps sonore, et prétendent que *le timbre en dépend.* Cette supposition reposait seulement, jusqu'ici, sur ce qu'on savait le timbre indépendant de la durée et de l'amplitude ou intensité de la vibration ; nous la soumettrons, par la suite, à un examen plus approfondi. On prouvera qu'elle est exacte en ce sens, que chaque timbre différent exige une forme différente de la vibration ; en revanche, à des formes différentes peuvent correspondre des timbres identiques.

En étudiant d'une manière précise et attentive, au moyen de l'oreille, l'influence des diverses formes d'ondes, par exemple, celle décrite dans la figure 8, qui correspond à peu près à celle de la corde

de violon, il se présente un fait singulier et inattendu, connu depuis assez longtemps, il est vrai, des musiciens et des physiciens seuls, mais généralement considéré comme une simple curiosité, parce qu'on qu'on n'en savait ni la généralité, ni l'influence prépondérante sur la production de tous les timbres. Avec une attention suffisamment grande, l'oreille n'entend pas seulement le son dont la hauteur dépend de la durée de la vibration, comme nous l'avons dit plus haut; elle entend encore, en outre, toute une série de sons plus élevés qu'on appelle *harmoniques*, à l'opposé de ce premier son, dit *son fondamental*, qui est le plus grave et, en général, le plus fort de tous, et d'après la hauteur duquel nous jugeons de la hauteur de l'ensemble. La série est exactement la même pour tous les sons musicaux, c'est-à-dire correspondant à un mouvement périodique de l'air ; elle comprend :

1° L'octave supérieure du son fondamental, exécutant deux fois plus de vibrations que ce dernier. Si le son fondamental est ut_0, cette octave supérieure sera ut_1 ;

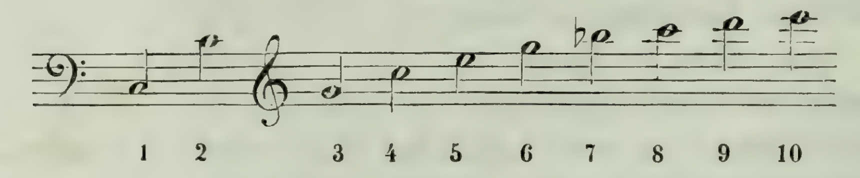
2° La quinte de cette octave, sol_1, faisant trois fois plus de vibrations que le son fondamental ;

3° La seconde octave au-dessus, ut_2, quatre fois plus de vibrations ;

4° La tierce majeure de cette octave, mi_2, cinq fois plus de vibrations;

5° La quinte de cette octave, sol_2, six fois plus de vibrations.

Puis viennent, avec une intensité toujours décroissante, les sons dont les vibrations sont 7, 8, 9 fois plus nombreuses que celles du son fondamental. En notation usuelle :



Les chiffres au-dessous des lignes indiquent combien de fois le nombre de vibrations contient celui correspondant au son fondamental.

Nous avons appelé *son musical*, la sensation complexe produite dans l'oreille par un ébranlement périodique de l'air. Nous y trouvons maintenant une série de sons distincts que nous appellerons *sons élémentaires* ou *partiels*. Le premier est le *son fondamental*, les autres, plus élevés, sont ses *harmoniques*. Le numéro d'ordre de chaque son partiel dans la série, indique le rapport du nombre de ses vibrations au nombre de vibrations du son fondamental. Ainsi la seconde note fait 2 fois plus de vibrations, la troisième 3 fois plus, etc.

Ohm a, le premier, émis et soutenu l'opinion, qu'il n'y a qu'une seule forme de vibration telle, que le son ne présente pas d'harmo-

niques, et se compose uniquement du son fondamental. C'est la forme que nous avons décrite plus haut, comme particulière au pendule et au diapason, et représentée dans les figures 6 et 7. Nous l'appellerons *vibration pendulaire*, ou, comme elle ne produit point un assemblage de différents sons, *vibration simple*. On déterminera plus tard dans quel sens, non-seulement toutes les autres sonorités, mais même toutes les autres formes de vibrations, peuvent être considérées comme *composées*. Nous emploierons donc comme équivalentes les expressions de vibration *simple* ou *pendulaire* (1).

Les faits rapportés ici montrent que tout son musical où il est possible de distinguer des harmoniques se compose, en réalité, d'un ensemble de sons *élémentaires* ou *partiels*.

Nous venons de voir que le timbre dépend de la forme de la vibration, mais que celle-ci détermine, à son tour, le phénomène des harmoniques ; nous nous poserons maintenant la question de savoir, dans quelle mesure la variété des timbres dépend de la réunion du son fondamental, avec des harmoniques d'intensité variable. Cette question se présente à nous comme un moyen qui conduit à éclaircir l'essence jusqu'ici tout à fait problématique du timbre. Mais nous devons nécessairement résoudre le problème suivant : comment l'oreille arrive-t-elle à décomposer chaque son en une série de sons élémentaires, et que signifie cette décomposition ? C'est ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

(1) La loi de cette vibration se déduit d'une manière bien simple de la construction représentée dans la figure 10. Imaginons un point décrivant, avec une vitesse constante, un cercle autour du centre *c*, puis un observateur placé, très-loin, le long de la ligne *eh*,

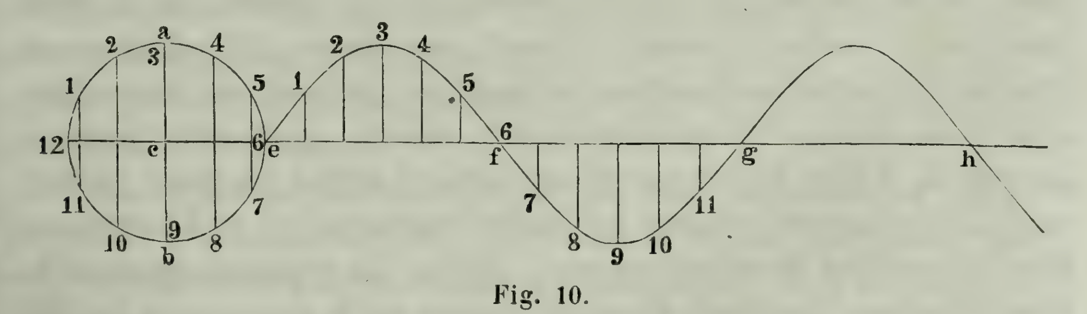


Fig. 10.

de manière à ne point voir le plan, mais seulement la tranche du plan du cercle. Pour lui, le point semblera simplement monter et descendre le long du diamètre *ab*. Ce mouvement ascendant et descendant suit exactement la loi de la vibration pendulaire. Pour le représenter graphiquement par une courbe, partageons la longueur *eg* qui correspond à la durée d'une vibration entière, en autant de parties (ici en 12) que la circonférence du cercle, et élevons aux points de division de la ligne *eg*, les ordonnées 1, 2, 3, etc., égales à celles du cercle correspondant aux chiffres 1, 2, 3, etc. On obtient ainsi la courbe dessinée dans la figure 10, qui est, avec de plus grandes dimensions, celle décrite par le diapason (*fig.* 6). On démontre mathématiquement que, dans cette espèce de vibration, la distance du point vibrant à sa position première, est égale au sinus d'un arc proportionnel au temps, d'où le nom de vibration sinusoïdale également employé.

CHAPITRE II

COMPOSITION DES VIBRATIONS.

A la fin du chapitre précédent, nous avons rencontré ce fait remarquable, que l'oreille humaine, dans certaines circonstances, décompose le son produit par un instrument, en une série de sons élémentaires, le fondamental et les harmoniques, tous perçus et isolément distingués par elle. Que l'oreille puisse distinguer les sons les uns des autres, quand ils émanent d'une source variable et de plusieurs corps sonores différents, c'est ce que nous apprend l'expérience de chaque jour. Nous pouvons, sans difficulté, dans un concert, suivre la marche mélodique de chacune des parties vocales ou instrumentales, en concentrant sur elle notre attention ; avec un peu plus d'exercice, on arrive même à suivre le mouvement simultané de beaucoup de parties entremêlées.

Cette faculté existe, du reste, non-seulement pour le son musical, mais aussi pour le bruit ou pour le mélange des deux éléments. Quand plusieurs personnes parlent à la fois, nous pouvons, en général, à volonté, écouter et comprendre les paroles de l'un ou de l'autre des interlocuteurs, pourvu que sa voix ne soit pas trop écrasée par la seule intensité des autres. Il s'ensuit d'abord, que beaucoup d'ondes sonores diverses, peuvent simultanément se propager à travers une même masse d'air, sans se détruire réciproquement ; ensuite, que l'oreille humaine possède la faculté d'analyser le mouvement aérien composé, produit par plusieurs agents sonores agissant simultanément, et de retrouver dans la sensation de ce mouvement, chacun des éléments constitutifs. Nous décrirons plus tard, de quelle nature est le mouvement de l'air dans le cas de plusieurs sons simultanés, et en quoi ce mouvement composé se distingue du son unique. On verra alors qu'il n'y a pas, dans tous les cas, une différence certaine et bien marquée entre le mouvement de l'air dû à plusieurs sons, émanant de sources distinctes, et celui correspondant au son d'un seul corps sonore ; en tant, toutefois, que ce mouvement de l'air peut agir sur l'oreille, et que celle-ci, par conséquent, grâce à la faculté d'analyser les sons composés, peut aussi décomposer le son simple en ses parties constitutives.

De cette manière, le sens de cette expression, *séparation d'un seul son musical en sons partiels*, deviendra clair pour nous, et nous verrons que ce phénomène repose sur une des propriétés fondamentales et essentielles de l'oreille humaine.

Nous commencerons par l'étude du mouvement aérien qui correspond à plusieurs sons, se produisant simultanément et dans le voisinage les uns des autres. Pour donner une idée claire de la nature de ce mouvement, nous pourrons encore nous appuyer sur l'exemple des ondes qui se produisent à la surface d'une eau tranquille. Nous avons vu que, si une surface liquide est ébranlée en l'un de ses points par la chute d'une pierre, l'ébranlement se propagera à la surface sous for me d'onde circulaire, embrassant des points de plus en plus éloignés. Jetons maintenant, au même instant, deux pierres en des points différents de la nappe d'eau ; nous aurons deux centres d'ébranlement ; à chacun d'eux correspond un cercle d'onde, et ces deux derniers, s'étendant sans cesse, finissent par se rencontrer. Aux deux points où ils se coupent, les molécules d'eau sont mises en mouvement par les deux ébranlements à la fois. Cela n'empêche pas les deux circonférences d'ondes de continuer chacune leur route, comme si l'autre n'existait pas. Quand elles poursuivent leur chemin, les points, qui étaient confondus, se séparent, les ondes se montrent de nouveau isolées à l'œil, et avec une forme invariable. A ces petites ondes circulaires, produites par la chute de plusieurs pierres, peuvent encore venir s'ajouter d'autres espèces d'ondes, comme celles dues à l'action du vent, ou celles déterminées par le passage d'un bateau à vapeur. On verra nos cercles se propager sur l'eau agitée, aussi tranquillement et aussi régulièrement que sur l'eau tranquille. Les grandes ondes ne sont pas détruites par les petites, ni inversement, pourvu qu'elles ne viennent pas se briser contre quelque obstacle, qui viendrait évidemment arrêter leur marche régulière.

En général, il n'est pas facile de regarder une vaste étendue d'eau, d'un point élevé, sans voir, en grand nombre, divers systèmes d'ondes se superposer et s'entre-croiser mutuellement. C'est le spectacle que nous donne surtout la mer, considérée du haut d'un rivage élevé, lorsqu'après un vent violent, elle commence à se calmer. On voit alors, tout d'un coup, les grandes vagues venant des lointaines extrémités de l'horizon, par longues lignes droites, se distinguer çà et là par l'écume qui blanchit leur crête, se succéder à des distances régulières et se diriger contre le rivage. A chaque changement dans la forme de ce dernier, elles sont rejetées dans des directions différentes, en sorte que les ondes, qui arrivent ensuite, sont coupées obliquement par les précédentes. Un bateau à vapeur en marche produit

encore, derrière lui, un système d'ondes en forme de fourche, et l'oiseau qui pêche un poisson détermine la formation de petites vagues circulaires. L'œil de l'observateur arrive facilement à suivre séparément toutes ces diverses ondes, grandes ou petites, larges ou étroites, droites ou courbes ; il peut voir que leur marche, sur la surface de l'eau, est, pour chacune, exactement la même que si la nappe liquide n'était pas simultanément sollicitée par d'autres forces et d'autres mouvements. Je dois avouer que, toutes les fois que j'ai pu suivre avec attention ce spectacle, il m'a fait éprouver une jouissance intellectuelle d'une nature toute particulière ; ici, en effet, l'œil physique perçoit ce que, pour les ondes invisibles de l'atmosphère, une longue série de déductions compliquées peut seule expliquer à l'œil intellectuel de l'entendement.

Nous pouvons nous imaginer un spectacle tout à fait semblable dans l'intérieur d'une salle de danse. Là, nous avons un certain nombre d'instruments de musique, des personnes qui causent, des vêtements qui bruissent, des pieds qui glissent, des verres qui grincent, etc. Tout cela donne naissance à des ondes distinctes, qui se propagent dans l'air de la salle, sont renvoyées par les murs, reviennent en sens inverse jusqu'à la rencontre d'un autre mur, sont encore réfléchies, et ainsi de suite, jusqu'à leur extinction. Il faut s'imaginer des ondes de 8 à 2 pieds de long, émanant de la bouche des hommes et des instruments les plus graves, d'autres plus courtes, de 2 à 4 pieds, sortant des lèvres des femmes ; le bruit des vêtements produit de petites ondes fines entremêlées. Bref, c'est un enchevêtrement de mouvements divers, qu'il est presque impossible de se représenter dans toute sa complication.

Et, pourtant, l'oreille est en état de distinguer chacun des éléments constitutifs d'un tout si embrouillé ; nous devons en conclure que, dans l'atmosphère, toutes ces ondes coexistent sans se détruire réciproquement. Maintenant, comment peuvent-elles ainsi coexister les unes et les autres, puisque chaque onde, en chaque point de l'atmosphère, tend à donner une valeur particulière à la densité ou à la vitesse de l'air ?

Il est clair, qu'en chaque point de l'atmosphère, à un moment donné, il ne peut y avoir qu'une seule valeur de la densité, que les molécules aériennes ne peuvent avoir qu'un seul mouvement déterminé, une seule vitesse également déterminée, et ne peuvent se mouvoir que dans un seul sens au même instant.

Ce qui se passe ici, l'œil peut le voir directement sur les ondes liquides. Supposons une nappe d'eau, sillonnée de longues et larges ondes, et jetons-y une pierre ; les ondes circulaires, qui vont se pro-

duire, couperont les précédentes, tantôt dans les parties élevées, tantôt dans les parties déprimées de la surface liquide; les éminences et les dépressions se produiront, au-dessus et au-dessous du niveau de l'eau agitée, comme si les ondes se propageaient sur une surface liquide naturelle et plane. Par conséquent, si une éminence du second système d'ondes se superpose à une éminence du premier, la hauteur totale de l'eau, au-dessus de son niveau, sera égale à la somme des deux hauteurs; si une dépression du second système se produit au fond d'une dépression du premier, l'abaissement total sera égal à la somme des deux abaissements partiels. Si une éminence, du premier système d'ondes, se rencontre avec une dépression du second, sa hauteur sera diminuée de toute la profondeur de la dépression. Pour abréger cette description, considérons comme *positives*, les hauteurs au-dessus du niveau de l'eau tranquille (éminences) ; comme *négatives*, les distances comptées au-dessous (dépressions) ; faisons leur somme dans le sens algébrique du mot, c'est-à-dire l'addition effective des grandeurs de même signe, et la soustraction des grandeurs de signe contraire. En recourant ainsi à l'addition algébrique, notre description de la surface de l'eau, sollicitée simultanément par les deux systèmes d'ondes, peut se réduire aux termes suivants : *La hauteur de l'eau, en chacun de ses points et à chaque instant, est égale à la somme des hauteurs qu'atteindrait le liquide, s'il était sollicité, au même point et au même instant, par chacun des systèmes d'ondes, agissant seul.*

L'œil distingue, dans ce cas, aussi clairement et aussi facilement que possible, la marche des ondes, en supposant, comme dans l'exemple précité, un cercle d'ondes se propageant sur une nappe d'eau déjà sillonnée par de grandes ondes rectilignes. Ici, en effet, les deux systèmes se distinguent notablement l'un de l'autre par la longueur, la hauteur et la direction de leurs ondes. Mais, avec quelque attention, l'œil reconnaît que le phénomène est encore exactement le même, lorsque les deux systèmes ne présentent dans leur forme que des différences moindres : par exemple, si les ondes longues et rectilignes, courant vers la côte, se mêlent à celles réfléchies par le rivage dans un sens un peu différent. Alors, se produisent ces vagues qu'on voit souvent, dentelées en forme de peigne, les éminences de l'un des systèmes étant recoupées par les dépressions de l'autre qui revient du rivage. La multiplicité des formes est ici extraordinairement grande, et la description de chacune d'elles nous conduirait beaucoup trop loin. Pour chaque variété du mouvement de la nappe liquide, l'observateur attentif arrivera, aisément et sans description, au résultat. Il nous suffit ici d'avoir, par un premier exemple, rendu bien

clair, pour le lecteur, ce que l'on entend par l'addition des ondes entre elles (1).

La surface de l'eau peut donc affecter, à un moment donné, une seule forme, bien que sollicitée simultanément par deux systèmes d'ondes distincts, tendant à lui imprimer chacun une forme particulière. De même, et dans le sens indiqué plus haut, nous pouvons considérer deux systèmes d'ondes, comme agissant ensemble et se superposant, en concevant les éminences décomposées en deux parties correspondant à chaque système.

Dans le même sens, on trouve aussi, dans l'air, une superposition de différents systèmes d'ondes sonores. A chaque passage d'ondes, la densité de l'air, la vitesse et la position des molécules, sont modifiées momentanément. En certains points de l'onde aérienne, comparables aux éminences de l'eau, la densité est augmentée et l'air, qui n'a pas, comme l'eau, un espace libre pour s'étendre, se condense. En d'autres points assimilables aux dépressions, l'air est raréfié, et, par suite, la densité devient moindre. De même encore, bien qu'au même point et au même instant, il ne puisse y avoir les deux valeurs de la densité particulières à chacun des systèmes, on peut cependant ajouter (algébriquement) ces deux valeurs, comme les hauteurs et les profondeurs de la nappe d'eau. Si deux condensations coïncident, la densité résultante sera plus forte que chacune d'elles ; si deux ondes dilatées se rencontrent, le contraire aura lieu ; enfin, si une condensation coïncide avec une dilatation, elles se superposeront et se neutraliseront, partiellement ou en totalité.

Les déplacements des molécules d'air se composent également. Si les déplacements, que tendent à produire les deux systèmes d'ondes pris isolément, ne sont pas dans le même sens, ils se composent suivant la diagonale des deux directions : ainsi, par exemple, l'un des systèmes tend-il à déplacer la molécule d'air de bas en haut, et l'autre, de gauche à droite, la molécule prendra une direction oblique de bas en haut et de droite à gauche.

Pour le but que nous nous proposons, nous n'avons pas besoin d'approfondir davantage cette composition de mouvements de sens divers. La seule chose qui nous intéresse est l'action de la masse d'air sur l'oreille, action qui dépend uniquement du mouvement de l'air dans le conduit auditif. Mais ce dernier est, chez l'homme, assez étroit relativement à la longueur des ondes sonores, pour que nous n'ayons à

(1) Les vitesses et les déplacements des molécules d'eau se composent aussi d'après la loi dite du parallélogramme des forces. Cette composition se réduit d'ailleurs à une simple addition, quand les hauteurs des ondes deviennent négligeables par rapport à leurs longueurs.

considérer que les mouvements de l'air parallèles à son axe, et pour que nous n'ayons à analyser que les déplacements des molécules gazeuses, de l'extérieur à l'intérieur et réciproquement, c'est-à-dire entre l'orifice et le fond de l'appareil auditif. Les grandeurs de ces déplacements, aussi bien que celles des vitesses des molécules de l'extérieur à l'intérieur, comportent la même espèce d'addition que les éminences et les dépressions de l'eau agitée. *Donc, si plusieurs corps sonores déterminent simultanément dans l'atmosphère la formation de plusieurs systèmes d'ondes sonores, les modifications de la densité, les déplacements et les vitesses des molécules dans le conduit auditif, sont respectivement égaux à la somme des quantités correspondantes provenant de chacun des systèmes pris isolément* (1) ; et, dans ce sens-là, nous pouvons dire de toutes les vibrations qui émanent des divers systèmes d'ondes, qu'elles coexistent simultanément dans notre oreille, sans se détruire mutuellement.

Après avoir ainsi résolu cette première question, de savoir dans quel sens il était possible à plusieurs systèmes d'ondes différents de coexister simultanément sur l'eau ou dans l'air, arrivons à déterminer la nature de la faculté départie aux organes de nos sens, pour qu'ils puissent redécomposer un tout aussi complexe en ses éléments constitutifs.

J'ai déjà fait remarquer, que l'œil, qui embrasse une vaste étendue d'eau violemment agitée, peut, avec assez de facilité, isoler les lignes d'ondes les unes des autres, et les suivre séparément dans leur marche. L'œil a ici, sur l'oreille, un grand avantage ; il peut embrasser d'un seul coup une vaste étendue de la surface liquide. Il distingue donc facilement si les lignes d'ondes sont droites ou courbes, si elles ont ou non le même centre de courbure, dans quel sens elles se propagent ; dans toutes ces remarques, il trouve autant de moyens de distinguer si deux éminences appartiennent au même système, de démêler les différentes portions de chacune d'elles. En outre, sur l'eau, les ondes d'inégale longueur avancent avec des vitesses inégales, et, par suite, s'il se produit, à un moment donné, une confusion qui rende l'analyse difficile, immédiatement après l'une des lignes dépasse l'autre, et bientôt elles redeviennent séparément visibles. De cette manière, il devient très-facile à l'observateur de distinguer, dans l'ensemble, chaque système d'après son point de départ, et de le suivre de l'œil pendant sa marche subséquente. Ainsi, le sens de la vue ne pourra jamais confondre deux systèmes d'ondes ayant deux origines différentes, par

(1) Il en est de même pour tout l'espace rempli par l'air, si on compose les déplacements d'après les lois du parallélogramme des forces.

exemple, les cercles produits sur l'eau par la chute de deux pierres en des points différents. Au point d'intersection, il pourra ne pas être facile de distinguer les deux cercles, mais ils resteront toujours séparés sur la plus grande partie de leur circonférence. L'œil ne peut donc pas arriver facilement à confondre un mouvement ondulatoire simple avec un mouvement composé. C'est là précisément ce que fait l'oreille dans des circonstances tout à fait semblables, lorsqu'elle décompose un son émanant d'une source unique, en une série de sons élémentaires.

En présence d'un système d'ondes sonores, l'oreille se trouve dans une position bien plus défavorable que l'œil en face d'un système d'ondes liquides. Elle n'est affectée, en effet, que par le mouvement de la masse d'air qui se trouve dans le voisinage immédiat de la membrane du tympan, dans le conduit auditif. Le diamètre de ce dernier étant relativement petit par rapport à la longueur d'onde, qui varie de 6 pouces à 32 pieds pour les sons usités en musique, la section transversale du conduit auditif ne correspond qu'à un seul point de la masse d'air en mouvement. Ce conduit a lui-même une longueur trop faible, pour que la densité ou la vitesse varient sensiblement de l'un à l'autre de ses points ; les distances qui séparent la plus forte de la plus faible densité, la plus grande vitesse positive de la plus grande vitesse négative, sont, en effet, toujours égales à une demi-longueur d'onde. L'oreille se trouve, par conséquent, un peu dans la même situation que l'œil obligé de regarder, à travers un tube étroit, un point de la surface liquide dont il pourrait distinguer l'ascension ou la descente. Si, dans ces circonstances, nous demandions à la vue d'entreprendre l'analyse des ondes composées, il est aisé de comprendre que l'œil échouerait complétement dans la plupart des cas. L'oreille n'est pas en état de reconnaître la nature du mouvement de l'air dans les parties éloignées de l'espace, la surface plane ou sphérique des ondes qui viennent la frapper, leur combinaison en un ou plusieurs cercles, le sens de leur marche. Il lui manque tous ces auxiliaires qui assurent principalement la supériorité de l'œil.

Si pourtant, l'oreille, malgré toutes ces difficultés, possède la faculté de distinguer les sons émanant de sources différentes, — et, par le fait, elle témoigne d'une remarquable aptitude à résoudre ce problème, il faut qu'elle opère cette séparation au moyen de procédés et de facultés tout à fait différents de ceux employés par l'œil. Quels que soient ces procédés, — nous chercherons plus tard à en déterminer la nature, — il est évident que la faculté d'analyser une masse sonore doit reposer sur des propriétés déterminées du mouvement de l'air, qui peuvent se distinguer dans une masse gazeuse aussi faible, que

celle renfermée dans le conduit auditif. Si les mouvements des molécules aériennes, dans le conduit auditif, sont identiques dans deux circonstances différentes, l'oreille éprouvera des impressions identiques provoquées par les deux mouvements, qu'ils émanent ou non d'une même source sonore.

Nous avons déjà conclu que la masse d'air en contact avec la membrane du tympan, peut être considérée comme un seul point de l'air ambiant, au point de vue qui doit être adopté ici. Y a-t-il donc, dans le mouvement d'une seule molécule d'air, des propriétés différentes, selon que le son est simple ou composé? Nous avons vu qu'à chaque son correspond un mouvement périodique de l'air, que la hauteur est déterminée par la longueur de la période, mais que, dans l'intervalle d'une même période, la nature du mouvement, entièrement arbitraire, comporte une multiplicité infinie de formes différentes. Le mouvement de l'air dans l'oreille n'est-il pas périodique, ou du moins la période n'est-elle pas assez courte pour produire un son perceptible ; il se distinguera par là même de tous les mouvements caractéristiques d'un seul son. L'espèce de mouvement correspond alors à des bruits, ou à un certain nombre de sons se produisant simultanément. Il en est ainsi, en réalité, dans la plupart des cas où le hasard a seul présidé à l'assemblage des sons, et où on n'a pas eu en vue de former des accords musicaux consonnants ; dans le domaine de la musique elle-même, avec le tempérament aujourd'hui adopté pour les instruments, il arrive rarement de réunir, avec la précision suffisante, les conditions indispensables à la production de mouvements aériens exactement périodiques. Par conséquent, dans la plupart des cas, le défaut de périodicité dans le mouvement, sera caractéristique d'une masse sonore composée.

Mais il peut se faire qu'une masse sonore composée donne aussi *un mouvement exactement périodique ;* c'est ce qui arrive particulièrement, *lorsque tous les sons qui la composent ont*, *comme nombres de vibrations*, *des multiples entiers d'un seul et même nombre*, ou, ce qui est la même chose, *lorsque tous les sons peuvent*, *d'après leur hauteur*, *être considérés comme les harmoniques d'un seul et même son fondamental.*

On a déjà dit, dans le premier chapitre, que les nombres de vibrations des harmoniques étaient des multiples entiers du nombre de vibrations du son fondamental. Un exemple précis éclaircira le sens de ces règles. La courbe A (*fig.* 11), en adoptant les conventions du premier chapitre, représente le mouvement simple, pendulaire, tel que le diapason le détermine dans l'air du conduit auditif. Dans cette courbe, les longueurs horizontales figurent donc les temps, et les hau-

teurs verticales, les déplacements correspondants des molécules d'air dans l'oreille. A la suite de la courbe A figurant le premier son élémentaire, construisons maintenant la courbe B, du second son élémentaire, l'octave du précédent. Deux vibrations de la courbe B, ont une longueur exactement égale à celle d'une seule vibration de la courbe A. Sur A, prenons les divisions $d_0\delta$ et $\delta\delta_1$, portions de la courbe

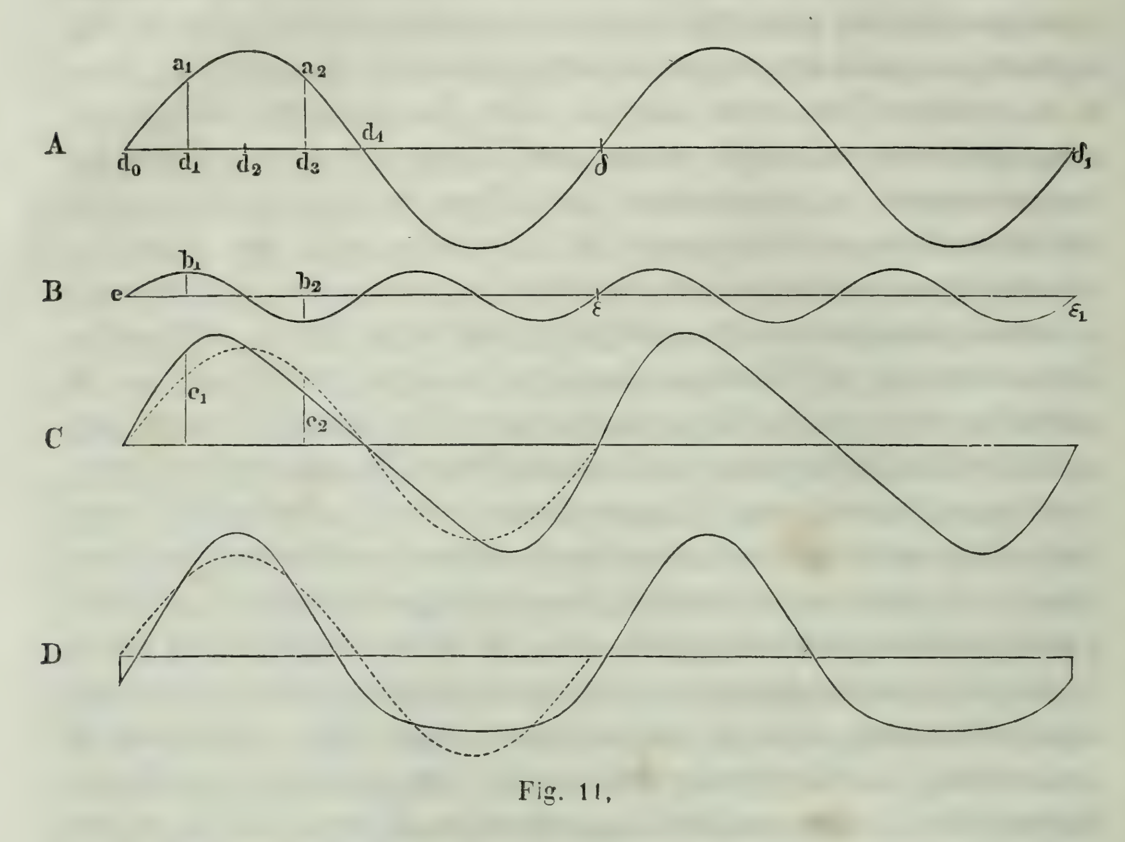


Fig. 11.

exactement congruentes. La courbe B sera partagée de même en parties congruentes, aux points e, ε et ε_1. Nous pourrions encore partager en deux chacune des divisions $e\varepsilon$ et $\varepsilon\varepsilon_1$, et nous aurions encore des parties congruentes entre elles correspondant à chacune des périodes de B. Mais, en réunissant ensemble deux périodes de B, nous obtenons une portion de B d'une longueur exactement égale aux divisions de A.

Si maintenant les deux sons se produisent simultanément et que les points e et d_0, ε et δ, ε_1 et δ_1 coïncident successivement, les hauteurs de la portion de courbe $e\varepsilon$ vont s'ajouter à celles de $d_0\delta_1$, exactement comme les hauteurs de $\varepsilon\varepsilon_1$ à celles de $\delta\delta_1$. Le résultat de cette addition est représenté par la courbe C. La ligne ponctuée est une reproduction de la portion $d_0\delta$ de la courbe A. Elle sert à rendre immédiatement sensible à l'œil, la composition des mouvements. On voit facilement que, partout, la courbe C s'élève au-dessus ou s'abaisse au-dessous de A, de quantités précisément égales à celles dont la courbe B s'écarte au-dessus ou au-dessous de son axe. Les hauteurs de la courbe C sont

donc égales, conformément à la règle de la composition des vibrations, à la somme (algébrique) des hauteurs correspondantes de A et de B. Ainsi, l'ordonnée c_1 de C est la somme des ordonnées a_1 et b_1 de A et de B; la portion inférieure de cette ordonnée c_1, jusqu'à la courbe ponctuée, est égale à a_1 et le surplus à b_1. Par contre, l'ordonnée c_2 est égale à la hauteur a_2 diminuée de la hauteur négative b_2; on trouve de la même manière toutes les hauteurs de la courbe C.

Le mouvement figuré par la courbe C est donc périodique et a la même longueur de période que A, cela est évident. Par le fait, l'addition de la division $d_0\delta$ de A et $e\varepsilon$ de B donnera les mêmes résultats que l'addition des portions exactement égales $\delta\delta_1$ et $\varepsilon\varepsilon_1$, et si on suppose les deux courbes prolongées, il en sera de même de toutes les divisions suivantes.

Mais il est évident aussi que, pour se superposer dans l'addition par portions toujours égales, les deux courbes devront pouvoir se partager en parties congruentes d'une longueur de période exactement égale; c'est le cas de la figure 11 où deux périodes de B valent exactement une période de A. Les longueurs horizontales de notre figure représentent les temps, et, en remontant des courbes aux mouvements réels, on voit que le mouvement aérien résultant des sons A et B est périodique, malgré sa complexité, parce que l'un des sons fait, dans le même temps, deux fois autant de vibrations que le second.

Il résulte aussi de l'exemple précédent, que la forme particulière des deux courbes A et B n'entre pour rien dans ce fait que leur somme C est aussi une courbe exactement périodique. Quelle que soit la forme de A et de B, pourvu seulement que chacune puisse être partagée en portions congruentes de même longueur que les divisions de l'autre, c'est-à-dire que ces portions embrassent une, deux, trois périodes des courbes, une division de A, composée avec une division de B, donnera toujours une division de C, exactement égale à toutes celles qu'on peut former avec les divisions correspondantes de A et de B.

Si une pareille division de C embrasse plusieurs périodes des courbes considérées, comme dans la figure 11, les portions $e\varepsilon$ et $\varepsilon\varepsilon_1$, embrassent deux périodes du son B, B sera, selon sa hauteur, l'un des harmoniques du son fondamental dont la période a la longueur de chacune des divisions principales (dans la *fig.* 11, du son A), conformément à la règle énoncée plus haut.

Pour donner une idée de la multiplicité des formes qui peuvent résulter de compositions relativement simples, je ferai remarquer qu'on obtient déjà une forme différente pour la courbe composée, en se bornant à déplacer un peu B sur A, avant de procéder à l'addition. Déplaçons B de manière à faire coïncider le point e avec d_1, nous ob-

tiendrons la courbe 11-D présentant d'étroites éminences et de larges dépressions, mais les versants des éminences ont la même pente, tandis que dans la courbe C l'un des versants est plus incliné que l'autre. Déplaçons encore B de manière à faire coïncider *e* avec d_2, la courbe composée sera symétrique de C (comme l'image d'un objet dans un miroir), c'est-à-dire, que la forme sera la même, mais que la droite sera devenue la gauche. Le versant le plus incliné, situé à gauche dans C, sera à droite dans D. Enfin, si nous faisons coïncider *e* avec d_0, nous obtenons une courbe semblable à D renversée, comme on l'obtiendrait en retournant le livre, de manière à placer les dépressions en haut et les éminences en bas.

Toutes ces courbes et leurs dérivées sont périodiques. La figure 12-*c* présente d'autres courbes composées périodiques C et D, résultant

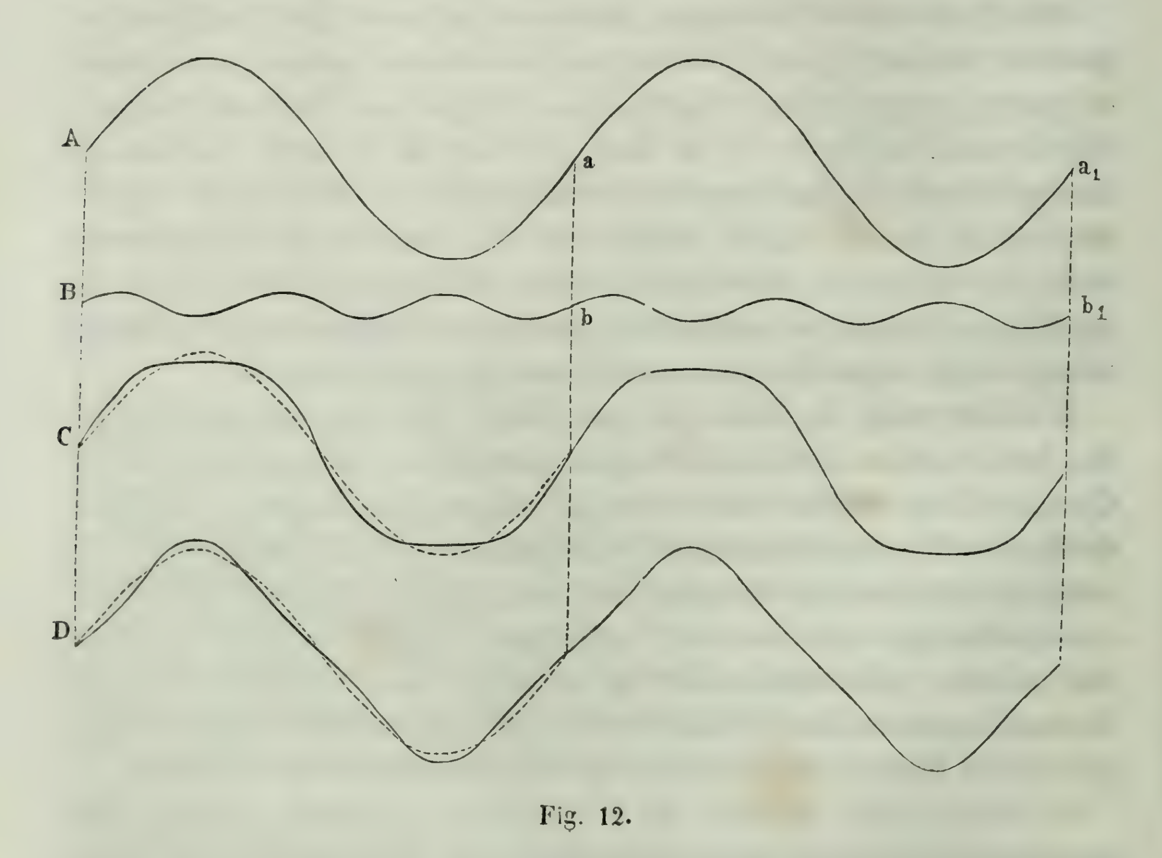


Fig. 12.

des mêmes courbes A et B, dont les périodes sont dans le rapport de 1 à 3. Les lignes ponctuées sont encore la copie de la première vibration de A, pour permettre au lecteur de s'assurer que la courbe composée s'élève ou s'abaisse partout, au-dessus ou au-dessous de A, de quantités égales à celles dont B s'écarte au-dessus ou au-dessous de la ligne horizontale. Dans C, A et B sont ajoutées, telles qu'elles se trouvent l'une au-dessous de l'autre; dans D, on a d'abord déplacé B d'une demi-longueur d'onde à droite, avant de l'additionner avec A. Les deux formes diffèrent entre elles, et diffèrent aussi de toutes celles

précédemment obtenues. Les éminences et les dépressions sont larges dans C, étroites dans D.

Nous trouvons dans tous les cas semblables, que le mouvement composé est parfaitement et régulièrement périodique, c'est-à-dire exactement de même nature que celui correspondant à un son isolé. Les courbes composantes de nos exemples correspondent au mouvement d'un son simple. Par conséquent, les mouvements représentés dans la figure 11, par exemple, pourraient être produits par deux diapasons à l'octave l'un de l'autre. Mais nous verrons plus tard qu'il suffit de souffler doucement dans une flûte pour déterminer dans l'air un mouvement correspondant à ceux figurés par les courbes C et D (*fig.* 11). Les mouvements de la figure 12 pourraient être produits par deux diapasons résonnant simultanément et à la douzième l'un de l'autre. Mais un seul tuyau bouché de la plus petite dimension (Registre des Quintes), pourrait produire le mouvement représenté dans la figure 12 par C ou D.

Le mouvement de l'air dans le conduit auditif n'offre donc aucune particularité qui permette de distinguer un son composé d'un son simple. A moins que d'autres circonstances fortuites neviennent en aide à l'oreille, comme, par exemple, si l'un des diapasons résonne avant l'autre et si on entend le second son s'ajouter au premier, si on entend le coup frappé sur le diapason, ou le bruit de l'air dans la flûte ou le tuyau, il n'y a aucun caractère qui permette de distinguer si un son est simple ou composé.

Que fait donc l'oreille, en présence d'un pareil mouvement de l'air? L'analyse-t-elle, ou ne l'analyse-t-elle pas? L'expérience nous apprend que, si deux diapasons accordés à l'octave ou à la douzième résonnent simultanément, l'oreille est parfaitement en état de distinguer l'un des sons de l'autre, quoique cette distinction lui soit un peu plus difficile que pour tout autre intervalle. Mais si l'oreille est en état de décomposer ainsi le son composé, formé par deux diapasons résonnant ensemble, elle ne pourra pas s'empêcher d'opérer cette analyse pour le même mouvement aérien produit par une seule flûte, un seul tuyau d'orgue. Et, cependant, voici ce qui se passe en réalité; un seul son émanant de l'un de ces instruments sera décomposé, comme nous l'avons déjà vu, en sons partiels, un son fondamental et des harmoniques (un seul dans nos exemples).

La décomposition d'un seul son en une série de sons partiels, repose donc sur la faculté qui permet à l'oreille, de distinguer deux sons différents, et, dans les deux cas, la séparation s'opère d'après une règle où la considération d'un ou plusieurs instruments produisant des ondes sonores n'entre pour rien.

La loi, d'après laquelle l'oreille analyse le son, a été posée pour la première fois comme générale, par G. S. Ohm. Dans le précédent chapitre on a déjà donné une partie de cette loi, en disant que le mouvement aérien, dit *simple* ou *pendulaire*, dans lequel les molécules vibraient d'après les lois de l'oscillation du pendule, pouvait seul déterminer dans l'oreille la sensation d'un son *simple*. Donc, tout mouvement de l'air, correspondant à une masse sonore composée, peut, d'après la règle de Ohm, se décomposer en une somme de vibrations simples, pendulaires, à chacune desquelles correspond un son simple que l'oreille perçoit, et dont la hauteur est déterminée par la durée de la vibration correspondante.

La démonstration de l'exactitude de cette règle, la cause qui assigne à la seule vibration pendulaire un rôle si caractérisé, seront exposées plus bas dans le quatrième et le sixième chapitre. Il ne s'agit encore ici que de rendre bien clair le sens de la règle.

La forme de la vibration pendulaire est immuable et toujours la même. On peut seulement changer l'amplitude ou la durée de la période. Nous avons déjà vu dans les figures 11 et 12 comment de la composition de deux vibrations simples pouvait naître une assez grande multiplicité de formes. Le nombre de ces formes peut, sans avoir recours à de nouvelles vibrations simples d'une autre période, s'augmenter encore plus que dans nos dessins, en modifiant le rapport des hauteurs de A et de B, ou en déplaçant B sur A de quantités différentes. D'après ces exemples très-simples, le lecteur pourra se faire une idée de la prodigieuse variété de formes qu'on obtiendrait, en composant un plus grand nombre de vibrations simples correspondant à tous les harmoniques du même son générateur, et en formant par leur addition des courbes périodiques. On pourrait, à volonté, augmenter ou diminuer les hauteurs de chacune d'elles, les déplacer d'une quantité arbitraire sur le son fondamental, ou, pour employer l'expression des physiciens, faire varier l'amplitude et la différence de phase, entre eux et le son fondamental; à chaque variation de l'amplitude et de la différence de phase, correspondrait une nouvelle variété de vibration composée.

La multiplicité des diverses formes de vibration qu'on peut obtenir ainsi en composant des vibrations pendulaires n'est pas seulement extraordinairement grande; elle dépasse toute limite assignable. C'est ce que le célèbre mathématicien français Fourier a prouvé dans une loi mathématique, que nous pouvons formuler de la manière suivante, en l'appliquant à notre sujet : *Toute forme quelconque de vibration, régulière et périodique, peut être considérée comme la somme de vibrations pendulaires, dont les durées sont une, deux,*

trois, quatre, etc., fois moins grandes que celle du mouvement donné.

Les *amplitudes* des vibrations simples composantes (les hauteurs dans nos courbes) et les *différences de phase* (les déplacements relatifs des courbes dans le sens horizontal), peuvent être déterminées dans chaque cas, ainsi que l'a montré Fourier, par des méthodes de calcul particulières qui ne comportent pas une exposition élémentaire. Il en résulte qu'*un mouvement donné, régulier et periodique, ne peut être décomposé que d'une seule manière, en un certain nombre de vibrations pendulaires.*

Mais nous avons prouvé qu'un mouvement régulier et périodique donne un son musical, et qu'une vibration simple donne un son élémentaire; nous pouvons donc, appliquant à l'acoustique la loi de Fourier, la formuler en ces termes :

Tout mouvement vibratoire de l'air dans le conduit auditif, correspondant à un son musical, peut toujours, et toujours d'une seule manière, être considéré comme la somme d'un certain nombre de mouvements vibratoires pendulaires, correspondant aux sons élémentaires du son considéré.

D'après ces lois, toute forme de vibration, quelle qu'elle soit, peut être considérée comme une somme de vibrations simples; cette décomposition est donc tout à fait indépendante de la possibilité pour l'œil de distinguer les formes simples composantes, dans la courbe considérée. Je dois appuyer là-dessus, parce que j'ai vu assez souvent les savants eux-mêmes, trompés par de fausses suppositions, s'imaginer que la vibration figurée pouvait accuser de petites ondes, correspondant aux harmoniques perceptibles. Déjà, dans nos exemples (*fig.* 11 et 12), on a pu se convaincre que l'œil peut distinguer la décomposition, dans les parties où figure en lignes ponctuées la courbe du son fondamental, et non dans celles où les courbes C et D des deux figures sont seules indiquées.

Un observateur qui aurait la forme de la vibration simple exactement gravée dans la mémoire, croirait peut-être pouvoir arriver à faire cette distinction; mais il échouerait, sans aucun doute, s'il voulait ne recourir qu'à la vue seule, comme avec les courbes figurées dans les figures 8 et 9 du premier chapitre.

Celles-ci présentent des lignes droites et des angles aigus.

On se demandera peut-être comment il est possible, en composant des courbes d'une courbure aussi douce et aussi régulière, que nos courbes d'ondes simples A et B des figures 11 et 12, d'arriver à des lignes droites et à des angles aigus. On peut répondre à cela, qu'il faut un nombre infini de vibrations simples, pour obtenir des courbes aussi

discontinues que celles dont il s'agit. En composant un grand nombre de vibrations simples, disposées de manière qu'en certains points les courbures soient toutes dans le même sens, et, en d'autres, en sens contraire, les courbures s'ajoutent dans le premier cas, et nous obtenons finalement une courbure infiniment grande, c'est-à-dire un angle aigu ; dans le second, elles se détruisent, et il en résulte une ligne droite.

On peut poser comme règle générale, que plus l'intensité des harmoniques est grande, et plus le mouvement de l'air présente de discontinuité. Si le mouvement varie graduellement et régulièrement, ce qui donne une courbe de vibration en forme d'arc légèrement recourbé, les sons élémentaires les plus graves, les plus voisins du son fondamental, présentent seuls une intensité notable. Si le mouvement varie brusquement, la courbe présente des angles, c'est à dire de brusques changements de courbure ; ce sont alors les harmoniques élevés qui ont le plus de force, quoique, dans tous ces cas, les amplitudes diminuent avec la hauteur des harmoniques (1).

Nous apprendrons encore, dans le cinquième chapitre, à connaître d'autres exemples de résolution d'une forme de vibration donnée, en sons élémentaires.

Le théorème cité de Fourier prouve seulement, d'abord, qu'il est mathématiquement possible, de considérer un son musical comme une somme de sons élémentaires, les mots étant pris dans le sens adopté plus haut ; aussi, les mathématiciens ont-ils toujours trouvé commode de prendre ce mode de décomposition des vibrations pour base de leurs recherches acoustiques. Mais il ne s'ensuit pas du tout que nous soyons obligés de considérer les choses de la même manière. Nous pouvons plutôt nous demander, si ces sons élémentaires d'un son musical, donnés par la théorie mathématique et perçus par l'oreille, ont une existence réelle dans la masse d'air extérieure.

Ce mode de décomposition des formes vibratoires, tel que le décrit et le rend possible le théorème de Fourier, ne serait-ce qu'une fiction mathématique, admissible pour la facilité du calcul, mais ne correspondant pas nécessairement à quelque chose dans la réalité ? Pourquoi

(1) Si n est le numéro d'ordre d'un son élémentaire, l'amplitude des harmoniques diminue pour les valeurs élevées croissantes de n de la manière suivante ; si l'amplitude de la vibration elle-même éprouve une brusque variation, l'amplitude des harmoniques diminue comme $\frac{1}{n}$; si la dérivée varie brusquement, ce qui donne un angle aigu pour la courbe, comme $\frac{1}{n \cdot n}$; si la courbure change brusquement, comme $\frac{1}{n \cdot n \cdot n}$; si aucune dérivée n'est discontinue, l'amplitude doit diminuer plus rapidement, comme ε^{-n}.

considérer la vibration pendulaire comme l'élément irréductible de tout mouvement vibratoire ?

Nous pouvons imaginer un tout partagé d'une foule de manières différentes ; dans un calcul, nous pouvons trouver commode de remplacer le nombre 12 par 8 + 4, pour mettre 8 en évidence ; mais il ne s'ensuit pas que 12 doive être, toujours et nécessairement, considéré comme la somme de 8 et de 4. Dans d'autres cas, il pourra être plus avantageux de considérer ce nombre comme la somme de 7 et de 5.

La possibilité mathématique, établie par Fourier, de décomposer en vibrations simples tout mouvement sonore, ne peut nous autoriser à conclure que ce soit là le seul mode admissible de décomposition, si nous ne pouvons prouver qu'il a un sens essentiellement réel. La circonstance que l'oreille opère cette décomposition, porte cependant à croire, que cette analyse a une signification indépendante de toute théorie, dans le monde extérieur. Cette opinion est aussi confirmée précisément par le fait rapporté plus haut, que ce mode de décomposition est plus avantageux que tout autre dans les recherches mathématiques. Car les modes de démonstration qui cadrent avec la nature intime des choses, sont naturellement ceux qui conduisent aux résultats théoriques les plus convenables et les plus clairs. Mais il ne serait pas prudent de commencer cette recherche en s'aidant des propriétés de l'oreille, parce que celles-ci sont extraordinairement compliquées, et ont elles-mêmes besoin d'explication. Nous allons donc, dans le prochain chapitre, rechercher si la décomposition en vibrations simples a une signification réelle dans le monde extérieur, *indépendamment de l'oreille*, et nous serons en état de prouver que certains effets mécaniques déterminés dépendent de la présence ou de l'absence d'un certain son élémentaire dans la masse sonore. L'existence des sons élémentaires acquiert ainsi une signification réelle, et la connaissance de leurs propriétés mécaniques éclairera d'une nouvelle lumière leurs relations avec l'oreille humaine.

CHAPITRE III

ANALYSE DU SON AU MOYEN DES *SONS PAR INFLUENCE*.

Nous avons à démontrer maintenant, que la présence, dans une masse sonore, de certains sons élémentaires simples, détermine dans le monde extérieur des actions mécaniques particulières, indépendantes de l'oreille et de ses sensations, indépendantes de toute considération purement théorique, et qui donnent, par conséquent, à la décomposition en vibrations pendulaires, une signification réelle, *objective*.

On trouve une action de ce genre dans le phénomène des *sons produits par influence*. Ce phénomène se présente dans tous les corps qui, une fois mis en mouvement par un ébranlement quelconque, exécutent une longue série de vibrations avant de revenir au repos. Si on leur imprime des secousses très-faibles, mais régulièrement périodiques, beaucoup trop insignifiantes chacune pour communiquer un mouvement appréciable, il se produira néanmoins, dans les corps en question, des vibrations sensibles et même très-fortes, pourvu que la période de chaque secousse faible soit exactement égale à la période des vibrations propres du corps. Si, au contraire, la période des secousses régulières diffère de celle des vibrations propres, il ne se produit qu'un faible mouvement tout à fait inappréciable. Ces secousses périodiques proviennent ordinairement d'un autre corps, exécutant des vibrations régulières. Ces dernières font donc, au bout d'un certain temps, vibrer le premier corps. C'est dans ces circonstances que se produit le phénomène que nous appelons *vibrations* ou *sons par influence*. Les vibrations peuvent être, ou assez rapides pour produire un son, ou trop lentes pour déterminer, dans l'oreille, une sensation quelconque; cela ne change rien à l'essence de ce phénomène bien connu des musiciens. Qu'on prenne, par exemple, deux cordes rigoureusement à l'unisson sur deux violons différents; si on ébranle l'une d'elles avec l'archet, l'autre entre en vibrations. Mais l'essence du phénomène est plus facile à saisir, dans les exemples où la lenteur des vibrations permet d'en observer isolément toutes les phases.

Il est bien connu, par exemple, qu'un homme et même un enfant peuvent, en tirant en mesure sur la corde, mettre en mouvement les

plus grosses cloches d'église, dont le poids est si considérable, que l'homme le plus fort, voulant les changer de place, ne pourrait les ébranler d'une manière appréciable, à moins d'espacer ses efforts à intervalles rhythmés. La cloche oscille, comme un pendule, assez longtemps encore avant de revenir graduellement au repos, quoique abandonnée à elle-même, et sans aucune force pour entretenir le mouvement. Le mouvement diminue peu à peu cependant, parce qu'à chaque oscillation, le frottement sur les axes et la résistance de l'air anéantissent une portion de l'impulsion primitive.

Quand la cloche oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre, le levier fixé à la partie supérieure de l'axe, s'élève et s'abaisse avec la corde. Si, au moment où il descend, un enfant se suspend à l'extrémité inférieure de la corde, le poids de son corps agira sur la cloche, de manière à en accélérer le mouvement. Cette accélération pourra être très-petite, mais elle suffira pour produire, dans l'amplitude des oscillations de la cloche, un accroissement correspondant qui se conservera encore quelque temps, jusqu'au moment où il est anéanti par le frottement et la résistance de l'air. L'enfant, au contraire, se suspend-il à la corde à contre-temps ; au moment où la cloche monte, le poids du corps agit en sens inverse et diminue l'amplitude. Maintenant, qu'à chaque oscillation l'enfant se suspende à la corde, pendant qu'elle descend, et qu'il la laisse remonter librement ; il ne fera ainsi qu'accélérer chaque fois le mouvement de la cloche ; les oscillations deviendront peu à peu de plus en plus grandes, jusqu'à ce que le mouvement, imprimé par la cloche aux murs du clocher et à l'air extérieur, fasse exactement équilibre à la force déployée par l'enfant à chaque oscillation.

Le résultat de cette expérience repose essentiellement, sur ce que l'enfant exerce toujours son effort seulement au moment où il peut accélérer le mouvement de la cloche. Cet effort doit donc revenir périodiquement, par intervalles égaux à la période des oscillations propres de la cloche. L'enfant aurait pu, aussi bien et aussi vite, réduire au repos le mouvement de la cloche, en tirant sur la corde au moment où elle monte, et en ajoutant par conséquent, à la masse soulevée, le poids de son corps.

On peut à chaque instant réaliser l'expérience suivante qui est tout à fait analogue. Supposons un pendule, formé en suspendant, à l'extrémité inférieure d'un cordon, un corps pesant, un anneau, par exemple ; prenons l'extrémité supérieure du cordon dans la main, et imprimons à l'anneau un faible mouvement d'oscillation ; on peut arriver peu à peu à obtenir des oscillations très-appréciables, en déplaçant très-peu la main en sens inverse de l'anneau, chaque fois que le pendule prend

la position la plus écartée de la verticale. Ainsi, au moment où le pendule est le plus à droite, il faut porter la main un peu à gauche, et *vice versâ.* On peut aussi faire sortir le pendule de l'état de repos, en déplaçant un peu la main, en mesure, à des intervalles égaux à la période des oscillations propres du pendule. Les déplacements de la main peuvent être assez petits pour être presque imperceptibles, même à une attention soutenue ; c'est sur cette circonstance que repose l'emploi superstitieux de ce petit appareil comme baguette divinatoire. Si même l'observateur, sans songer à sa main, suit de l'œil les oscillations de l'anneau, la main accompagne l'œil et se déplace involontairement de part et d'autre de sa position initiale, dans le même temps que le pendule, dès que celui-ci commence à osciller un peu. Ces mouvements involontaires de la main passent généralement inaperçus, à moins que l'expérimentateur n'ait l'habitude d'observer précisément ces influences insensibles. Ils peuvent augmenter et entretenir le mouvement, et transformer tout déplacement fortuit du pendule en une série d'oscillations, qui paraissent se produire d'elles-mêmes, sans l'intervention de l'observateur; aussi ont-elles été attribuées à la présence de métaux ou de sources cachées.

Si on exécute les mouvements de la main à contre-temps, comme on l'a dit plus haut, le pendule revient bientôt au repos.

L'explication de cette expérience est bien simple. Si l'extrémité supérieure du cordon est fixée d'une manière invariable, le pendule, une fois mis en mouvement, continue à osciller quelque temps ; l'amplitude ne diminue que très-lentement. Nous pouvons prendre, pour mesure de cette amplitude, l'angle formé avec la verticale par le cordon, au moment où il s'en écarte le plus. Le corps pesant ayant atteint sa position limite à droite, on reporte la main à gauche ; l'angle du cordon avec la verticale s'agrandit alors évidemment, et, par suite, l'amplitude des oscillations est elle-même augmentée. En déplaçant en sens contraire l'extrémité supérieure du cordon, nous diminuerions l'amplitude.

Nous n'avons pas besoin ici d'exécuter les mouvements de la main, dans le même rhythme que les oscillations du pendule. Nous pouvons exécuter un seul mouvement de va-et-vient pour trois, cinq oscillations ou plus, et cependant, déterminer un accroissement sensible dans le mouvement du corps. Par exemple, le pendule étant à droite, portons la main à gauche, et arrêtons-nous jusqu'à ce qu'il ait été lui-même à gauche, puis à droite, puis encore à gauche ; remettons la main dans sa position première, attendons que le pendule soit revenu à droite, et ainsi de suite. Il y a donc trois oscillations entières pour un seul mouvement de va-et-vient de la main. On peut faire ainsi cinq, sept

oscillations, ou plus. La signification de l'expérience est toujours la même ; le mouvement de la main doit, chaque fois, se produire au moment de la plus grande déviation du pendule et en sens inverse ; l'amplitude est augmentée.

Nous pouvons aussi modifier un peu l'expérience en faisant un seul mouvement de la main pour deux, quatre, six oscillations et plus. Si nous donnions à la main un brusque déplacement, au moment où le pendule passe par la verticale, l'amplitude ne serait pas changée. Il faut donc déplacer la main à gauche quand le pendule est à droite, ce qui produit une accélération, le laisser revenir à gauche, puis, au moment où il repasse par la verticale, remettre la main dans sa première position ; attendre que le pendule, après avoir été à gauche, regagne l'extrémité droite de l'arc de cercle qu'il parcourt, puis recommencer les mouvements de la main.

Nous pouvons donc déterminer de rapides mouvements du pendule par de très-petits déplacements périodiques de la main, d'une période égale à une, deux, trois, etc., fois la durée des vibrations propres du pendule. Nous avons jusqu'ici considéré le mouvement de la main comme saccadé ; cela n'est pas nécessaire. Elle peut aussi se déplacer d'une manière continue dans un sens quelconque. En remuant la main d'une manière continue, il y aura, en général, des moments où le mouvement du pendule augmentera, et peut-être aussi d'autres où il diminuera. Pour imprimer au pendule de fortes oscillations, il faut arriver à ce que les accélérations l'emportent constamment, et ne soient pas détruites par la somme des retardements.

Maintenant, étant donné un mouvement périodique déterminé de la main, la question de savoir si de fortes oscillations peuvent en résulter, ne peut pas toujours se résoudre sans calcul. Mais la mécanique théorique donnerait la règle suivante : *On décompose le mouvement périodique de la main en une somme d'oscillations simples pendulaires*, exactement de la même manière que nous l'avons dit, dans le précédent chapitre, pour les mouvements périodiques des molécules d'air. *Si la période d'une de ces vibrations est égale à la durée de la vibration du pendule, il exécutera de fortes oscillations, sinon non.* On peut d'ailleurs, si on veut, composer de petits mouvements pendulaires, d'une autre durée, mais alors il ne se produira pas d'oscillations fortes et durables. Par conséquent, la décomposition en vibrations pendulaires a ici une signification réelle particulière, correspondant à des actions mécaniques déterminées, et, pour le but qu'on se propose ici, on ne peut la remplacer par aucune autre décomposition des déplacements de la main.

Dans les exemples précédents, le pendule pouvait osciller par in-

fluence, si la main se déplaçait suivant le rhythme des oscillations propres; le plus long des mouvements élémentaires de la main, celui correspondant au son fondamental d'une vibration sonore, était, en effet, à l'unisson avec le pendule. Si trois oscillations pendulaires correspondaient à un seul va-et-vient de la main, ce serait la troisième oscillation manuelle élémentaire, celle correspondant à la douzième du son fondamental, qui mettrait le pendule en mouvement.

Ce que nous venons d'apprendre des oscillations lentes, s'applique exactement aux vibrations si rapides des corps sonores. Tout corps élastique qui, par son mode de fixation, est en état de continuer à produire un son, quelque temps après avoir été mis en mouvement, peut aussi résonner par influence, si on lui communique une trépidation périodique d'une amplitude relativement très-faible, dont la période correspond à celle du son propre du corps.

Si on appuie doucement et sans frapper la corde, sur une touche d'un piano, de manière à soulever l'étouffoir, et qu'on chante fort, dans l'intérieur de la caisse, le son donné par la corde du piano, on entendra résonner cette dernière au moment où on cessera de chanter. Il sera facile de s'assurer, que c'est bien la corde en question qui répond au son chanté; car si on abandonne la touche de manière à replacer l'étouffoir sur la corde, celle-ci cesse de résonner. On reconnaît encore mieux la vibration par influence, en garnissant la corde de petits cavaliers en papier. Ils tombent aussitôt que la corde entre en vibrations. Elle vibre d'autant plus fort, que le chanteur donne plus exactement le son à elle propre. Un écart, même très-faible, de la hauteur exacte, fait cesser la vibration par influence.

Dans cette expérience, c'est la table d'harmonie de l'instrument, qui est la première frappée par les vibrations, que la voix humaine détermine dans l'air. La table d'harmonie consiste, comme on sait, en une planche longue et flexible, qui, par sa grande surface, est plus à même de communiquer à l'air les trépidations de la corde, que la faible surface de celle-ci directement en contact avec l'air. La table d'harmonie transmet les trépidations, déterminées dans la masse gazeuse par le son chanté, d'abord aux points d'attache de la corde, puis à la corde elle-même. La grandeur d'une seule de ces trépidations est cependant négligeable; aussi faut-il ajouter les actions d'une longue série d'entre elles, pour qu'un mouvement appréciable se produise dans la corde; pourvu toutefois que, dans cette somme d'actions mécaniques, comme précédemment, pour la cloche et le pendule, la période des petites trépidations communiquées par l'air aux extrémités de la corde, par l'intermédiaire de la table d'harmonie, soit exactement celle des vibrations propres à la corde. S'il en est ainsi, après une longue série

de vibrations, la corde prendra un mouvement très-fort, relativement aux vibrations de ses points d'attache.

Au lieu d'une voix humaine, nous pouvons d'ailleurs faire résonner un instrument de musique quelconque ; pourvu que le son émis soit juste, fort et prolongé, il fera vibrer par influence la corde de piano. Au lieu d'un piano nous pouvons prendre un violon, une guitare, une harpe, ou tout autre instrument à cordes muni d'une table d'harmonie, ou même des membranes tendues, des cloches, des plaques élastiques, etc., pourvu que ces dernières soient fixées de manière à produire un son d'une durée appréciable, sous l'influence d'un ébranlement.

Si la hauteur du son rendu par le premier corps, n'est pas exactement égale à celle du son propre du second corps, ce dernier peut encore vibrer par influence, mais avec d'autant moins de force que la différence des hauteurs est plus grande. Sous ce rapport, les divers corps sonores présentent de très-grandes différences, selon que, une fois ébranlés et mis en vibrations, ils résonnent plus ou moins longtemps avant de communiquer à l'air leur mouvement.

Les corps de faible masse, qui communiquent facilement leur mouvement à l'air, et cessent rapidement de vibrer, par exemple, les membranes tendues, les cordes de violon, vibrent aussi facilement par influence, parce que, par réciprocité, ils prennent facilement le mouvement de l'air, et qu'ils sont ébranlés d'une manière appréciable, par des vibrations aériennes qui n'ont pas tout à fait la même durée que celles du son propre ; aussi les limites des différences de hauteur entre lesquelles le phénomène peut se produire, sont-elles ici moins resserrées. L'influence, relativement plus grande, du mouvement de l'air sur des corps élastiques de ce genre, permet à la durée de la vibration propre, de s'altérer de manière à s'adapter à celle du son excitateur. En revanche, les corps élastiques de grande masse et difficiles à ébranler, comme les cloches et les plaques, qui résonnent longtemps, et qui ne communiquent que lentement leur mouvement à l'air, ne peuvent être que difficilement mis en mouvement par lui. Aussi faut-il une somme d'actions beaucoup plus considérable, et est-il par conséquent nécessaire de se rapprocher bien davantage du son propre, si on veut les faire vibrer par influence. Il est bien connu qu'en émettant, à l'intérieur de verres en forme de cloche, leur son propre, on peut leur imprimer un mouvement très-fort ; on raconte même que des chanteurs, doués de voix justes et puissantes, ont pu communiquer par influence à des verres semblables, des vibrations assez fortes pour les briser. La grande difficulté dans cette expérience est seulement de conserver au son toute la sûreté, la précision et la

justesse nécessaire, en chantant aussi fort. Ce sont les diapasons qu'il est le plus difficile de faire vibrer par influence. Pour y arriver, on doit les fixer sur des caisses résonnantes, accordées elles-mêmes au ton du diapason, comme le montre la figure 13. On en a deux semblables, qui ont exactement la même durée de vibrations; si on ébranle l'un des diapasons au moyen d'un archet, l'autre commence à vibrer par influence, même en un point éloigné de la même chambre, et on l'entend continuer de résonner, si l'on éteint les vibrations du premier. C'est là un des cas qui causent le plus d'étonnement, si on compare la lourde et forte masse d'acier mise en mouvement, avec la masse d'air qui détermine ces actions, et dont la puissance est si faible, qu'elle ne saurait ébranler même une barbe de plume, à moins que celle-ci ne fût à peu près à l'unisson du diapason. Des diapasons ainsi disposés mettent un temps notable à entrer en pleines vibrations, et la moindre discordance suffit déjà pour affaiblir très-notablement l'intensité de la vibration par influence. Pour s'en convaincre, on n'a qu'à coller à la fin du phénomène, un petit morceau de cire sur l'une des branches du second diapason, de manière qu'il fasse, par seconde, une vibration de moins peut-être que l'autre ; cela suffit à arrêter complétement les vibrations par influence, quoique la différence des hauteurs soit à peine appréciable pour l'oreille la plus exercée.

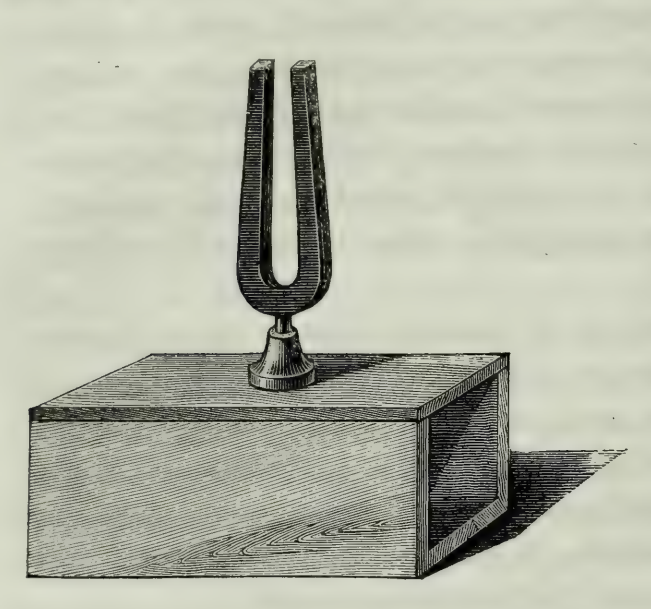


Fig. 13.

Après avoir ainsi décrit d'une manière générale, le phénomène des vibrations par influence, nous devons rechercher l'effet que produisent sur lui les diverses formes d'ondes.

Il faut remarquer, en premier lieu, que la plupart des corps élastiques qui entrent en vibrations d'une manière durable, sous l'influence d'une petite force agissant périodiquement, exécutent tous des vibrations pendulaires, sauf un petit nombre d'exceptions qui seront décrites plus bas. Mais ces vibrations peuvent être de plusieurs espèces ; il peut y avoir des différences, aussi bien dans la durée des vibrations, que dans la manière dont elles se répartissent entre les différents points du corps vibrant. Aux différentes valeurs de la durée,

correspondent les différents sons élémentaires que peut donner un corps élastique, appelés les *sons propres du corps ;* mais ce n'est qu'exceptionnellement, comme dans les cordes et les tuyaux d'orgue étroits d'un petit diamètre, que leurs hauteurs correspondent aux sons harmoniques dont il a été question ; plus généralement, ils ne sont pas harmoniques avec le son fondamental.

Dans beaucoup de cas, on peut aisément rendre visibles les vibrations, ainsi que leur répartition sur le corps sonore, en le couvrant de sable fin. Prenons, par exemple, une membrane (une vessie animale, ou une mince membrane de caoutchouc) tendue sur un anneau circulaire. La figure 14 représente les diverses formes que peut prendre

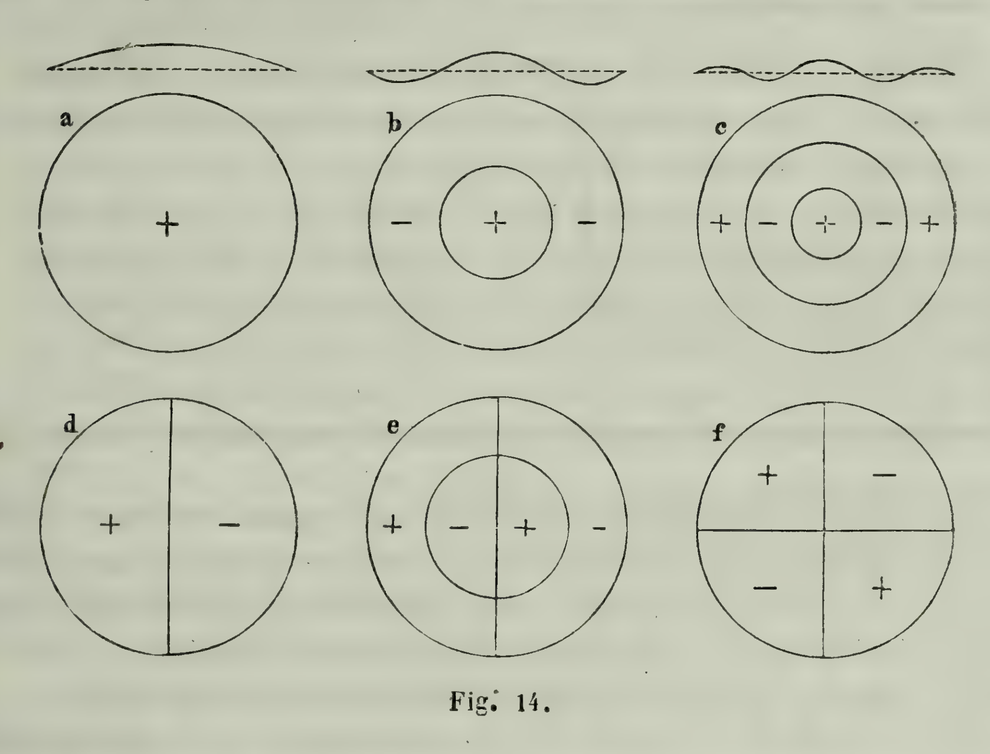


Fig. 14.

une membrane en vibrant. Les diamètres et les circonférences tracés sur la surface, désignent les points qui restent immobiles pendant la vibration, ce qu'on appelle les *lignes nodales.* Elles partagent la surface en un certain nombre de divisions, qui se transportent alternativement en haut et en bas; celles affectées du signe — se dirigeant vers le bas, quand celles affectées du signe + se dirigent vers le haut. Les figures *a*, *b*, *c*, indiquent les formes que peut prendre la section transversale de la membrane pendant le mouvement. Ce ne sont ici que les formes correspondant aux sons les plus graves et les plus facilement émis par la membrane. D'ailleurs, en choisissant celle-ci assez mince et assez régulièrement tendue, ce qui donne des sons de plus en plus élevés, on peut avoir un nombre de cercles et de diamètres aussi grand qu'on veut. Le sable répandu permet de rendre facilement visibles les formes de vibrations ; dès que la membrane

commence à vibrer, le sable se rassemble sur les lignes nodales.

On peut de même rendre visibles les lignes nodales et les formes de vibrations de membranes ovales ou quadrilatères, de plaques élastiques de différentes formes, de verges, etc. C'est là une série de phénomènes très-intéressants, découverts par Chladni, mais dont la description détaillée nous entraînerait trop loin de notre route. Il nous suffira donc de décrire ici le cas le plus simple, celui d'une membrane circulaire.

Pendant que la membrane fait cent vibrations correspondant à la figure *a*, les nombres suivants correspondent aux autres figures :

FORMES DE VIBRATIONS.	NOMBRE DE VIBRATIONS.	HAUTEURS.
a, pas de lignes nodales....	100	*ut*
b, un cercle...............	229,6	*ré*$_1$ +
c, deux cercles...........	359,9	*si*♭$_1$ +
d, un diamètre............	292	*sol*$_1$ —
e, un diamètre et un cercle.	159	*la*♭
f, deux diamètres.........	214	*ut*♯

J'ai appelé arbitrairement *ut* le son fondamental, seulement pour pouvoir désigner les intervalles des sons plus élevés. Les sons qui, sur la membrane, sont un peu plus élevés que la note donnée, sont affectés du signe +, ceux un peu inférieurs ont le signe —. Il n'y a aucun rapport rationnel entre le son fondamental et les autres.

Si on saupoudre de sable fin une membrane de ce genre très-mince, et qu'on émette dans le voisinage, avec force, le son fondamental correspondant, on voit le sable, ébranlé par les vibrations de la membrane, voler vers le bord et s'y rassembler. Donne-t-on un autre des sons élémentaires, le sable se rassemble sur la ligne nodale correspondante, et on peut facilement reconnaître ainsi, auquel de ses sons la membrane a répondu. Un chanteur, en état de bien émettre les sons de la membrane, peut facilement de loin faire prendre, à volonté au sable une disposition quelconque, rien qu'en donnant avec force les sons élémentaires. Cependant, en général, les figures simples correspondant aux sons graves, se produisent plus facilement que celles formées par les sons aigus. Ce qu'il y a de plus facile, c'est de mettre en mouvement l'ensemble de la membrane en émettant le son fondamental qui lui est propre ; aussi s'est-on beaucoup servi de ces membranes en acoustique, pour démontrer l'existence d'un son

déterminé, dans une portion déterminée de l'air ambiant. Pour arriver à ce résultat, ce qu'il y a de mieux, c'est de relier encore la membrane à un espace rempli d'air. A (*fig.* 15) est une bouteille de verre dont l'orifice est ouvert en *a*, et le fond, en *b*, est remplacé par une membrane tendue (une vessie de porc mouillée, qu'on fait sécher après l'avoir tendue et fixée sur la bouteille). En *c*, on fixe avec de la cire un fil de cocon qui supporte une petite boule de cire à cacheter. On a ainsi une sorte de pendule qui s'applique contre la membrane. Si celle-ci entre en vibrations, le petit pendule fait de très-brusques soubresauts. L'emploi de ce petit pendule est très-commode, si on n'a pas à craindre de confondre le son fondamental, avec un autre des sons propres de la membrane. Le sable s'envole, tandis que cet appareil est toujours en état de remplir sa fonction. Mais, si on veut distinguer, d'une manière certaine, les sons élémentaires qui mettent la membrane en vibrations, il faut placer la bouteille l'orifice en bas, et couvrir la membrane de sable. Si d'ailleurs la bouteille a le volume convenable, et que la membrane soit partout régulièrement tendue, on a sans difficulté le seul son fondamental de la membrane, peut-être un peu altéré par les vibrations d'influence que prend la masse d'air renfermée dans la bouteille. On rend plus grave ce son fondamental, en augmentant la grandeur de la membrane, ou le volume de la bouteille, en diminuant la tension de celle-là ou l'ouverture de celle-ci.

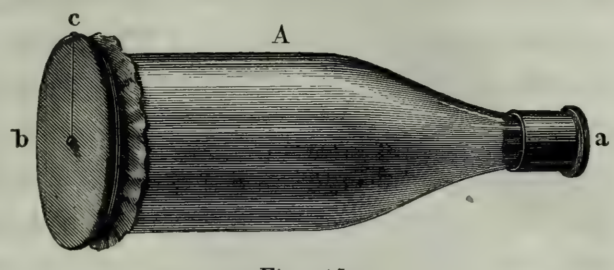


Fig. 15.

Une membrane de ce genre, libre ou tendue sur le fond d'une bouteille, peut entrer en vibrations sous l'influence, non-seulement des sons composés de même hauteur que les siens propres, mais aussi de ceux qui comprennent, parmi leurs harmoniques, le son propre de la membrane. En général, si un nombre quelconque de systèmes d'ondes s'entre-croisent dans l'air, pour savoir si la membrane va vibrer par influence, on peut considérer le mouvement de l'air directement en contact avec elle, comme mathématiquement décomposé en une somme de vibrations pendulaires.

La durée d'une de ces dernières est-elle égale à la durée de vibrations d'un des sons propres de la membrane, celle-ci prendra la forme correspondante. Si, au contraire, dans cette décomposition du mouvement de l'air, les termes correspondant aux sons de la membrane font défaut ou sont trop faibles, la membrane reste en repos.

Nous trouvons aussi par ce moyen, que la décomposition en vibrations pendulaires, et l'existence de certaines de ces vibrations exercent une action décisive sur le mouvement de la membrane ; de plus, il est impossible de remplacer la décomposition en vibrations pendulaires par une autre analogue. Ces vibrations composantes du mouvement de l'air, se manifestent donc comme exerçant une action dans le monde extérieur, indépendamment de l'oreille et de la théorie mathématique. Il en résulte, par conséquent, que les considérations théoriques, par lesquelles les mathématiciens ont été amenés tout d'abord à ce mode de décomposition des vibrations composées, ont un fondement réel dans la nature des choses.

J'ajouterai encore ici, comme exemple, la description d'une seule expérience :

J'avais une bouteille de même forme que celle de la figure 15, couverte d'une mince membrane de caoutchouc vulcanisé, de 49 millimètres de diamètre dans la portion vibrante ; la bouteille, haute de 140 millimètres, et garnie d'une monture en laiton de 13 millimètres de diamètre à l'orifice, donnait le $fa_2\sharp$; le sable se rassemblait alors en un cercle voisin du bord de la membrane. J'obtenais le même cercle en donnant sur un harmonium le même son $fa_2\sharp$, l'octave inférieure $fa_1\sharp$ et la douzième inférieure si_0 ; le $fa_0\sharp$ et le $ré_0$ donnaient aussi, mais plus faiblement, le même cercle. Ce $fa_2\sharp$ de la membrane coïncide avec le $fa_2\sharp$ de l'harmonium, c'est le premier harmonique du $fa_1\sharp$, le second du si_0, le troisième du $fa_0\sharp$, le quatrième du $ré_0$. Aussi toutes ces notes peuvent-elles mettre la membrane en mouvement, en faisant naître la forme du son propre le plus grave. On obtiendra au moyen du si_2, sur la membrane, un second cercle plus petit, de 19 millimètres de diamètre, le même plus petit au moyen du si_1, enfin à peine perceptible au moyen du mi_0, douzième inférieure, c'est-à-dire au moyen des sons dont les nombres de vibrations sont 1/2 et 1/3 de ceux du si_1.

Des membranes tendues sont donc d'un usage très-fréquent pour ces expériences et d'autres semblables, sur les sons élémentaires d'une masse sonore composée. Elles ont le grand avantage de ne pas faire entrer l'oreille en jeu ; mais elles ne sont pas très-sensibles pour les sons faibles. Pour la sensibilité, elles sont de beaucoup dépassées par mes *résonnateurs*. Ce sont des sphères creuses, et des tubes en cristal, à deux ouvertures, représentés dans les figures 16 *a* et *b*. L'une des ouvertures *a* a des bords coupés droit, l'autre *b* est en forme d'entonnoir, et disposée de manière à pouvoir s'introduire dans l'oreille. J'ai l'habitude d'entourer ce dernier orifice de cire à cacheter fondue ; quand elle est assez refroidie pour pouvoir être touchée sans danger, mais encore assez molle cependant, je fais entrer cet orifice dans le

conduit auditif. La cire à cacheter en prend la surface intérieure, et si ensuite on met le globe contre l'oreille, il la bouche facilement et d'une manière complète. Un résonnateur de ce genre est très-semblable, dans son ensemble, à la bouteille résonnante précédemment décrite, avec cette seule différence que la membrane du tympan remplace ici la membrane élastique.

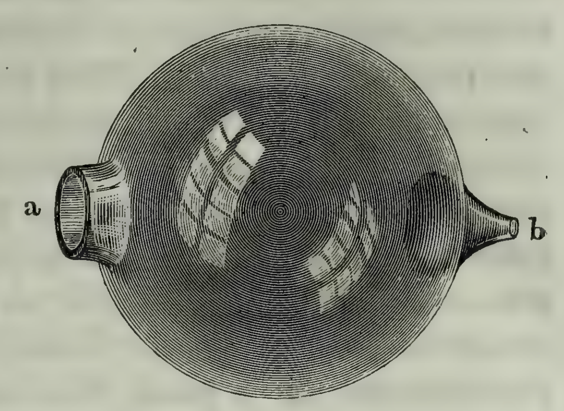


Fig. 16 *a*.

La masse d'air de ce résonnateur, en communication avec celle du conduit auditif, forme, avec la membrane du tympan, un système élastique, susceptible de vibrations particulières; le son fondamental de la sphère, beaucoup plus grave que les autres sons élémentaires, est considérablement renforcé par le phénomène de l'influence. L'oreille, en communication immédiate avec l'air intérieur à la sphère, perçoit directement aussi le son renforcé. Si l'une des oreilles est bouchée, au moyen d'une boule de cire à cacheter à laquelle on a donné la forme du conduit auditif (c'est ce qu'il y a de mieux), et qu'on mette à l'autre oreille un résonnateur, la plupart des sons émis dans le voisinage sont plus étouffés qu'à l'ordinaire; en revanche, si on donne le son propre du résonnateur, ce dernier éclate avec une force considérable dans l'intérieur de l'oreille. Toute personne, même avec une oreille dure et peu exercée, est ainsi en état de distinguer le son considéré émis assez faiblement, même au milieu d'un grand nombre d'autres; ainsi, par exemple, le son du résonnateur se reconnaît quelquefois dans le sifflement du vent, le bruit des roues, le murmure de l'eau. Aussi les résonnateurs en question constituent-ils un appareil extraordinairement plus sensible que les membranes. Si le son est très-faible relativement aux autres, il est avantageux d'approcher et d'éloigner alternativement le résonnateur de l'oreille. On reconnaît alors facilement, si le son du résonnateur se produit ou non au moment où on l'approche; on ne percevrait pas aussi facilement un son tenu d'une manière égale.

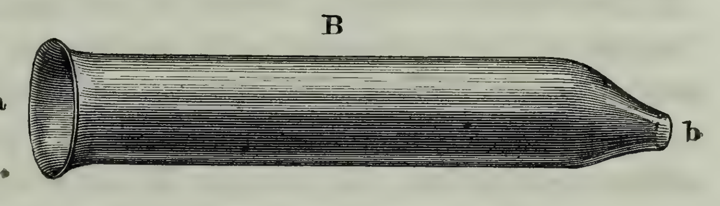


Fig. 16 *b*.

Une série déterminée de résonnateurs semblables permet donc, en

premier lieu à une oreille non exercée, d'exécuter d'une manière sûre une foule d'expériences où on arrive à distinguer nettement un seul son faible au milieu d'autres plus forts; tels sont les sons résultants, les harmoniques, et une série d'autres phénomènes qui seront décrits plus tard pour les accords, dont l'observation, sans le secours des résonnateurs, n'est jamais possible qu'à une oreille exercée et à une attention très-soutenue et habilement dirigée; à tel point, que ces phénomènes n'étaient accessibles jusqu'ici qu'à un petit nombre d'observateurs, et qu'une foule de physiciens et même de musiciens, n'avaient jamais pu parvenir à les distinguer. En second lieu, une oreille exercée peut pousser l'analyse d'une masse sonore beaucoup plus loin que par le passé. Sans leur secours, il m'eût été difficile d'exécuter, avec autant de précision et de sûreté que j'ai pu le faire, les observations qui seront rapportées par la suite.

Il faut bien remarquer ici que le son considéré est renforcé pour l'oreille, en tant seulement qu'il atteint une plus grande intensité dans la masse d'air du résonnateur. La théorie mathématique des mouvements de l'air nous apprend d'ailleurs que, pour des vibrations suffisamment petites, l'air exécute, dans le résonnateur, des vibrations pendulaires de même période que celles de l'air extérieur, et point d'autres; seulement l'intensité des vibrations pendulaires qui correspondent à la période du son propre du résonnateur, atteint une valeur notable, tandis que l'intensité de toutes les autres est d'autant plus faible, qu'elles s'éloignent davantage de l'unisson avec le son propre. L'oreille reliée au résonnateur ne doit entrer ici en considération, que parce que la membrane du tympan sert à limiter la masse d'air. Au point de vue théorique, l'appareil est tout à fait identique à nos bouteilles fermées par des membranes vibrantes (*fig.* 15); seulement la sensibilité en est extraordinairement augmentée, parce que la membrane élastique du résonnateur est, en même temps, celle du tympan de l'oreille, et se trouve en communication directe avec l'appareil nerveux du sens de l'audition. Nous n'obtenons dans le résonnateur un son intense que si, dans la décomposition du mouvement aérien extérieur en vibrations pendulaires, une de ces dernières se trouve avoir la même durée que le son propre du résonnateur; tout autre mode de décomposition ne pourrait donc donner de résultat exact.

On peut s'assurer facilement par des expériences des propriétés des résonnateurs. Qu'on en mette un à l'oreille, et qu'on fasse exécuter, par des instruments quelconques, un morceau de musique à plusieurs parties, dans lequel revienne souvent le son propre du résonnateur. Chaque fois, l'oreille l'entendra retentir d'une manière éclatante à travers tous les sons de l'accord.

On l'entend aussi souvent, mais moins fort, au moment où se produisent certaines notes plus graves ; et l'expérience démontre que les sons émis comprennent, parmi leurs harmoniques, le son du résonnateur. On les appelle ses *sous-harmoniques*. La durée de leurs périodes est précisément 2, 3, 4, 5, etc., fois plus grande que celle du son propre du résonnateur. Si, par exemple, ce dernier est ut_3, on l'entend résonner, quand on donne sur un instrument : ut_2, fa_1, ut_1, $la_0\flat$, fa_0, $ré_0$, ut_0, etc. Dans ces circonstances, c'est l'un des harmoniques du son émis dans l'air extérieur, qui fait résonner le résonnateur. Il faut remarquer cependant, que tous les harmoniques ne se rencontrent pas toujours dans le son d'un seul instrument et qu'ils présentent des intensités très-différentes d'un instrument à l'autre. Pour le violon, le piano, l'harmonium, ce sont les cinq ou six premiers qui résonnent le plus fort. Le prochain chapitre donnera des idées plus précises sur les harmoniques des cordes. Sur l'harmonium, les sons partiels impairs résonnent plus fort que les sons partiels pairs. Les résonnateurs permettent d'entendre facilement les harmoniques, dans les sons émis par la voix humaine ; mais leur intensité varie avec les différentes voyelles ; nous y reviendrons plus tard.

Parmi les corps en état de vibrer énergiquement, il faut encore citer les cordes qui sont fixées sur une table d'harmonie, comme dans le piano.

Au point de vue du phénomène de l'influence, les cordes ne se distinguent des corps précédemment énumérés, qu'en ce que leurs différentes formes de vibrations donnent des sons correspondant aux harmoniques du son fondamental ; les sons élémentaires des membranes, des cloches, des verges, etc., ne s'harmonisent pas, au contraire, avec le fondamental, et ne produisent, dans les résonnateurs, que des sons très-élevés, le plus souvent inharmoniques, dont le renforcement est très-insignifiant.

On peut étudier les vibrations des cordes, ou bien sur des cordons élastiques faiblement tendus, ne donnant point de son, et dont les mouvements sont assez lents pour être suivis de la main ou de l'œil ; ou bien sur les cordes sonores du piano, de la guitare, du monocorde, ou du violon. Dans le premier cas, on fait des cordes non sonores avec de longs ressorts de 6 à 10 pieds, en mince fil de laiton. On les tend faiblement et on les fixe aux deux extrémités. Une corde de ce genre peut exécuter des vibrations, d'une grande amplitude et d'une grande régularité, qui peuvent facilement être vues par un nombreux audi-

toire. On provoque les vibrations en imprimant près de l'une des extrémités, avec le doigt, un mouvement de va-et-vient dans le rhythme convenable.

Une corde peut être d'abord mise en vibrations, comme dans la figure 17 *a*, de manière que sa déviation de la position d'équilibre corresponde exactement à la forme d'une demi-onde simple. La corde ne donne qu'un seul son, le plus grave qu'elle puisse produire, sans qu'on puisse distinguer d'harmoniques.

Mais elle peut aussi prendre les formes *fig.* 17 *b*, *c*, *d;* la forme

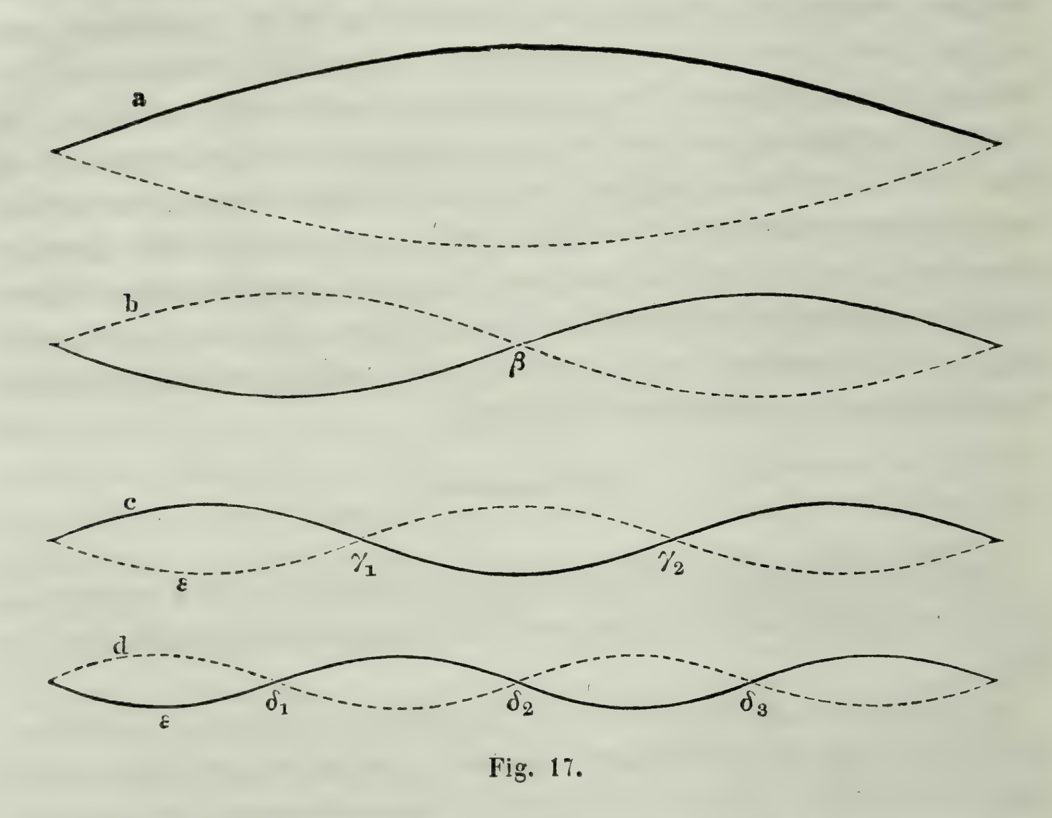


Fig. 17.

correspond alors à deux, trois, quatre subdivisions de la corde pour une vibration simple. Dans la forme *b*, la corde ne fait entendre d'autre son que l'octave supérieure du fondamental; dans *c*, la douzième, dans *d*, la seconde octave. La ligne ponctuée indique la position de la corde au bout du temps d'une demi-vibration. Dans *b*, le point β reste au repos complet, dans *c*, deux points γ_1, γ_2, sont en repos, en *d* les trois points δ_1, δ_2 et δ_3. Ces points immobiles ont reçu le nom de *nœuds*. Sur un fil de laiton vibrant, on les voit facilement à l'œil; sur une corde sonore, en y plaçant de tout petits cavaliers de papier qui sont rejetés par les points mobiles, mais qui restent sur les nœuds. Si la corde présente un nœud qui la divise en deux parties vibrantes, elle donne un son, dont le nombre de vibrations est double de celui du son fondamental. Pour deux nœuds, il est triple; pour trois, il est quadruple.

On arrive à faire vibrer une spirale de laiton suivant ces différentes formes, en l'attaquant avec le doigt dans le voisinage d'une extrémité, pour la forme *a* dans le rhythme de la plus longue vibration ; pour *b*, deux fois aussi vite ; pour *c*, trois fois ; pour *d*, quatre fois aussi vite. Ou bien encore, on appuie les doigts sur le nœud le plus voisin de l'extrémité de la corde que l'on pince entre ces deux points. Si donc on fixe γ dans la figure 17 *c*, ou δ_1 dans la figure 17 *d*, et qu'on pince la corde en ε, les autres nœuds s'accusent dans la vibration.

Pour mettre en évidence les formes de vibrations d'une corde sonore, ce qu'il y a de mieux, c'est de placer sur la table d'harmonie un diapason qui donne le son correspondant à la forme considérée. Si on ne veut obtenir qu'un nombre déterminé de nœuds, sans faire exécuter à chaque point de la corde des vibrations simples, il suffit de toucher légèrement avec le doigt l'un des nœuds considérés, et d'ébranler la corde soit par la percussion, soit avec l'archet. Le contact du doigt avec la corde étouffe toutes les vibrations simples qui n'offrent point de nœuds à l'endroit considéré, et il ne reste que celles qui laissent la corde en repos aux points dont il s'agit.

Le nombre des nœuds peut devenir assez grand sur de longues cordes minces ; il peut s'accroître jusqu'à ce que les portions, comprises entre deux nœuds consécutifs, soient trop courtes et trop rigides pour pouvoir encore résonner. Les cordes très-fines donnent, par conséquent, des sons plus élevés que les grosses. Sur le violon, sur les cordes graves du piano, on tire bien encore des sons avec dix divisions ; sur des fils de fer très-fins, on peut même en obtenir avec seize ou vingt divisions de la corde.

Les formes de vibrations, précédemment décrites, sont celles où chaque point de la corde exécute une vibration pendulaire. Ces mouvements n'éveillent jamais, par conséquent, dans l'oreille, que le sentiment d'un seul son. Dans toutes les autres, les vibrations des cordes ne sont pas simplement pendulaires, mais se produisent suivant une loi différente plus compliquée. C'est toujours ce qui arrive quand la corde est ou pincée (guitare, harpe, cithare), ou frappée (piano), ou ébranlée par l'archet.

Les mouvements qui se produisent alors, peuvent être considérés comme composés de beaucoup de vibrations simples, semblables à celles représentées dans la figure 17. La multiplicité des formes composées est infiniment grande ; la corde peut, en effet, prendre une forme quelconque (pourvu qu'on reste toujours entre des limites très-rapprochées de la position d'équilibre). Toute forme d'onde, en effet, peut être composée d'un certain nombre d'ondes simples, analogues à celles de la figure 17, comme on l'a dit dans le second chapitre. Une

corde pincée, frappée ou ébranlée par l'archet, peut donc faire entendre, outre le son fondamental, un grand nombre d'harmoniques, en général, d'autant plus, que la corde est plus fine. Le son particulièrement sifflant des cordes métalliques très-fines tire évidemment son origine de ces notes aiguës supplémentaires. On peut facilement, au moyen des résonnateurs, en distinguer jusqu'à seize. Les plus élevées sont trop voisines les unes des autres pour être séparées d'une manière appréciable.

Si donc une corde vibre sous l'influence d'un son musical, émis dans l'air ambiant à la hauteur convenable, il se produit, en règle générale et simultanément, toute une série de formes simples de vibrations; si, en particulier, le son émis coïncide avec le son fondamental de la corde, les harmoniques se correspondent également, et peuvent déterminer les formes diverses de vibrations de la corde. En général, la corde vibrera sous l'influence des vibrations aériennes, toutes les fois que, dans la décomposition de ces dernières, il existe un terme correspondant à l'un des harmoniques de la corde. Mais, le plus ordinairement, la présence d'un de ces termes entraîne celle de plusieurs autres, et il sera difficile, dans beaucoup de cas, de distinguer le son qui met la corde en mouvement. Aussi les cordes ordinaires ne sont-elles pas d'un usage aussi avantageux que les membranes, ou les masses gazeuses des résonnateurs, pour trouver les sons existant dans une masse sonore au moyen du phénomène de reste l'influence.

Pour faire l'expérience des sons par influence sur le piano, il faut enlever le couvercle de l'instrument, pour que le son se produise librement; baisser lentement la touche qu'on veut faire vibrer, l'ut_2, par exemple, en évitant de laisser frapper le marteau, puis placer en travers de la corde ut_2 une petite paille. On verra remuer et même tomber cette dernière, si on frappe certaines autres cordes du piano; le mouvement le plus fort de la paille correspond aux sous-harmoniques, ut_1, fa_0, ut_0, la_{-1}, fa_{-1}, $ré_{-1}$ et ut_{-1}. Il se produit aussi un mouvement, mais moins fort, si on frappe un des harmoniques supérieurs, ut_3, sol_3 ou ut_4 ; cependant, dans ce dernier cas, la paille si on la met sur un des nœuds.

En la plaçant, par exemple, sur celui du milieu, elle reste immobile pour ut_3 et ut_4, et s'agite pour sol_3. Placée au 1/3 de la corde, elle reste en repos pour sol_3, et s'agite pour ut_3 et ut_4. Enfin, on peut encore mettre la corde en vibrations, en émettant un des sous-harmoniques de l'un des harmoniques de la corde elle-même, par exemple, la note *fa*, dont le troisième harmonique ut_3 est identique au second de ut_2. Ici aussi, la paille reste immobile si on la place au milieu de

la corde ut_2, c'est-à-dire au point où se trouve le nœud du son ut_3. La corde *ut* se meut aussi, mais en présentant deux nœuds, si on émet le sol_2, le *sol*, ou le $mi\flat_1$, qui ont, avec ut_2, le son harmonique sol_3 commun.

Je ferai remarquer encore que, sur le piano, où l'une des extrémités de la corde est ordinairement cachée, il est facile de déterminer la position des nœuds, en appuyant légèrement le doigt sur les deux cordes du son considéré, et en frappant la touche. Si le doigt touche un des nœuds, l'harmonique considéré résonne pur et éclatant. Dans le cas contraire, le son de la corde est mat et de mauvaise qualité.

Tant qu'il ne se produit qu'un seul harmonique de la corde ut_2, on peut trouver la position des nœuds et déterminer, par conséquent, la forme de vibration correspondante. Mais les moyens mécaniques, précédemment décrits, ne permettent plus d'arriver à ce résultat, si deux harmoniques, ut_2 et sol_2, par exemple, résonnent simultanément, lorsqu'on frappe en même temps ces deux notes ; la corde tout entière se met en mouvement.

Ces phénomènes sont d'une observation plus compliquée pour les cordes ; la vibration de ces dernières est cependant soumise à la même loi que la vibration par influence des résonnateurs, des membranes et des autres corps élastiques. Elle s'accuse toujours par la décomposition du mouvement sonore en vibrations simples, pendulaires. La période d'une de ces dernières concorde-t-elle avec la période de l'un des sons propres de la substance élastique, corde, membrane ou masse d'air, celle-ci exécute de fortes vibrations par influence.

La décomposition du mouvement sonore, en vibrations pendulaires simples, a donc une signification *réelle* qui ferait défaut à toute autre décomposition du même genre.

Chaque système d'ondes simples, chaque vibration pendulaire, est un tout existant par lui-même ; la vibration simple se propage dans l'espace, elle met en mouvement d'autres corps élastiques ayant des sons propres correspondants ; et cela d'une manière tout à fait indépendante des autres sons de hauteur différente, émanés de la même source ou de sources diverses, qui se propagent en même temps qu'elle. Chaque son peut aussi, nous l'avons vu, être isolé de la masse sonore par un moyen purement mécanique, la vibration par influence des corps élastiques. Chaque son partiel existe donc, aussi bien et au même titre, dans le son complexe produit par un instrument, que, par exemple, les diverses couleurs de l'arc-en-ciel existent dans la lumière blanche, émanant du soleil ou de tout autre corps incandescent. La lumière n'est autre chose aussi qu'un mouvement vibratoire d'un milieu élastique particulier, l'éther, comme le son est un mouvement vibratoire de l'air.

Dans un rayon de lumière blanche, existe un mouvement, qui peut être considéré comme la somme de beaucoup de mouvements vibratoires périodiques de durée différente, correspondant aux diverses couleurs du spectre solaire. Naturellement, chaque molécule d'éther ne peut avoir, à un moment donné, qu'une vitesse déterminée et qu'un écart déterminé de sa position d'équilibre, exactement comme les molécules d'air dans un espace traversé par plusieurs systèmes d'ondes sonores. La molécule d'éther n'a jamais, en réalité, qu'un mouvement unique, et si, théoriquement, nous le considérons comme composé, c'est dans un certain sens arbitraire. Mais l'onde lumineuse peut aussi être décomposée en ondes correspondant aux différentes couleurs, par des moyens mécaniques empruntés au monde extérieur, soit par la réfraction à travers un prisme, soit par le passage de la lumière à travers de minces réseaux, et, mécaniquement parlant, chaque onde simple, correspondant à une couleur simple, existe par elle-même, indépendamment de toutes les autres.

Nous ne pouvons donc pas expliquer cette décomposition du son d'un instrument en un grand nombre d'éléments simples, par une illusion de l'oreille ou une fantaisie de l'imagination, comme j'ai vu quelques musiciens portés à le faire, quoique percevant eux-mêmes très-bien le phénomène. Nous devrions alors considérer aussi, comme des illusions de nos sens, les couleurs du spectre dans lesquelles on peut décomposer la lumière blanche. A chaque instant, l'existence réelle, *objective* des sons partiels, se manifeste par les vibrations d'influence exécutées par une membrane qui projette au loin le sable dont elle est couverte.

Une dernière remarque encore pour terminer : j'ai dû souvent, dans ce chapitre, à propos des conditions du phénomène de l'influence, m'appuyer sur la théorie mécanique du mouvement de l'air. Dans la théorie des ondes sonores, il s'agit d'une force bien connue, purement mécanique, la pression de l'air, et du mouvement des molécules gazeuses, sans mélange d'aucune explication hypothétique ; la mécanique théorique a, par conséquent, dans cet ordre d'idées, une autorité tout à fait incontestable, et les résultats doivent en être admis de confiance par le lecteur étranger aux mathématiques. On décrira un moyen expérimental d'examiner la question, dans le chapitre suivant, qui fixe les lois de l'analyse des sons par l'oreille. La démonstration expérimentale peut se faire aussi bien pour les membranes et les masses d'air vibrant par influence que pour l'oreille, et il en ressort l'identité des deux lois pour les deux ordres de phénomènes.

CHAPITRE IV

DE L'ANALYSE DES SONS PAR L'OREILLE.

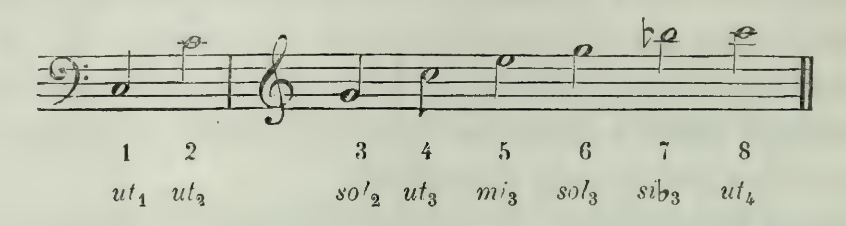
On a déjà dit plusieurs fois, dans les chapitres précédents, que l'oreille seule, sans le secours d'aucun appareil, décompose un son musical en une série de sons partiels correspondant aux vibrations pendulaires simples de la masse gazeuse, c'est-à-dire en une série d'éléments identiques à ceux que le phénomène de l'influence permet de distinguer dans le mouvement de l'air. Nous allons maintenant démontrer la vérité de cette proposition.

Quand on cherche, pour la première fois, à reconnaître les harmoniques des sons musicaux, on éprouve ordinairement une difficulté considérable rien qu'à les entendre.

Quand l'analyse des impressions de nos sens ne peut s'appuyer sur des différences correspondantes dans les objets extérieurs, elle se heurte à des obstacles *sui generis*, sur la nature et la signification desquels nous nous étendrons plus tard avec plus de détails. Il est nécessaire, en général, au moyen d'artifices convenablement choisis, d'appeler l'attention de l'observateur sur le phénomène qu'il s'agit de percevoir, jusqu'à ce qu'il le connaisse bien ; une fois qu'il en est là, il peut se passer de tout secours étranger. L'observation des harmoniques d'un son présente aussi des difficultés du même genre. Je donne ici tout de suite la description des conditions d'expérience, dans lesquelles il est le plus facile à un observateur novice d'apprendre à distinguer les harmoniques. Je ferai remarquer à ce propos, que l'éducation musicale de l'oreille n'entraîne pas nécessairement plus de facilité, plus de sûreté dans la perception des sons partiels. Il s'agit plutôt ici d'une certaine puissance d'abstraction de l'esprit, d'un certain empire sur sa propre attention, que des habitudes musicales. Le musicien exercé a cependant ici un avantage essentiel ; il se représente facilement les sons qu'il cherche à entendre, tandis qu'une personne étrangère à la musique est obligée de les faire résonner sans cesse pour les avoir toujours présents à la mémoire.

Il faut remarquer d'abord qu'on entend généralement les sons partiels impairs, c'est-à-dire les quintes, les tierces, les septièmes, etc., du son fondamental, plus facilement que les sons partiels pairs, qui

sont les octaves du son fondamental ou des autres harmoniques; de même qu'il est plus facile de distinguer dans un accord les quintes et les tierces que les octaves. Le second son partiel, le quatrième et le huitième sont des octaves du son fondamental, le sixième est l'octave du troisième, de la douzième ; il faut déjà quelque habitude pour les distinguer. Parmi les sons partiels impairs, les plus faciles à entendre sont en général, par ordre d'intensité, le troisième, c'est-à-dire la douzième du son fondamental ou la quinte de l'octave supérieure ; puis le cinquième ou la tierce, enfin le septième ou la septième mineure déjà beaucoup plus faible de la seconde octave. La série des harmoniques est représentée sur la portée par les notes suivantes :



Dans les commencements, pour observer les harmoniques, il est bon de faire résonner très-doucement, avant le son qu'on va analyser, les notes qu'on cherche à entendre, en leur conservant autant que possible un timbre identique à celui de l'ensemble. Le piano et l'harmonium conviennent très-bien à ces sortes de recherches, parce que ces deux instruments donnent des harmoniques d'une assez grande intensité.

Attaquez sur un piano le sol_2 de l'exemple noté ci-dessus, laissez retomber l'étouffoir de manière à empêcher les cordes sol_2 de résonner, puis frappez aussitôt et avec force la note ut_1, dont le sol_2 est le troisième son partiel ; si vous fixez bien votre attention sur la hauteur du sol_2, vous entendrez ce son se détacher du son complexe ut_1. Il en est de même si on donne d'abord très-doucement le cinquième son partiel, le mi_3, puis l'ut_1. Souvent même, ces harmoniques, si on laisse le mouvement de la corde s'éteindre de lui-même, s'entendront mieux que le son fondamental, parce que leur intensité paraît décroître moins rapidement. Sur les pianos de construction moderne, le septième et le neuvième son partiels, $si\flat_3$ et $ré_4$, sont très-faibles ou font complétement défaut. Si on répète ces expériences sur un harmonium, surtout en employant un registre mordant, on entend encore assez bien, en général, le septième son partiel et même le neuvième.

On objecte quelquefois que c'est par l'effet de l'imagination seule, que l'observateur croit distinguer l'harmonique dans la masse sonore, parce qu'il vient de l'entendre isolément à cela, je me bornerai à

répondre ici que si, sur un piano bien accordé suivant le tempérament ordinaire, on entend le mi_2 d'abord comme harmonique de l'ut_1, puis qu'on l'attaque directement, on constatera très-nettement que le second son est un peu plus haut que le premier. C'est la conséquence de l'emploi du tempérament égal. Par conséquent, si on constate une différence de hauteur entre les deux sons, l'un d'eux n'est certainement ni l'écho dans l'oreille, ni le souvenir de l'autre. On trouvera plus bas d'autres faits qui viennent complétement réfuter cette hypothèse.

Ce qui vaut encore mieux que l'expérience précédente sur le piano, c'est de prendre un instrument à cordes quelconque, piano, monocorde ou violon, et de produire le son qu'on désire entendre, d'abord comme harmonique isolé de la corde, en ébranlant cette dernière par la percussion ou par l'archet, tout en appuyant sur la corde en un point nodal du son considéré. L'analogie de la première note avec le son partiel de la masse sonore devient encore plus frappante, et, par suite, l'oreille reconnaît plus facilement le dernier. Dans le monocorde, il y a ordinairement, à côté de la corde, une échelle divisée à l'aide de laquelle on peut facilement déterminer la position des nœuds. Comme on l'a fait remarquer dans le précédent chapitre, les nœuds du troisième son partiel partagent la corde en trois parties égales, ceux du cinquième en cinq parties égales, etc. Sur le piano et le violon, on trouve facilement, par l'expérience, la position de ces points, en touchant légèrement la corde dans le voisinage du nœud cherché, dont on peut déterminer approximativement la place à vue d'œil, puis en ébranlant la corde et déplaçant le doigt jusqu'à ce que le son harmonique demandé sorte avec énergie et bien juste. Si on fait résonner la corde en touchant et abandonnant tour à tour le nœud, on a tantôt l'harmonique isolé, tantôt le son total de la corde, et il est relativement facile de reconnaître que le premier existe aussi dans le second. Avec des cordes minces, qui donnent les harmoniques supérieurs avec force, il m'est arrivé, de cette manière, de reconnaître jusqu'au seizième son partiel. Au delà, les harmoniques sont trop rapprochés pour que l'oreille puisse encore les distinguer facilement les uns des autres.

Dans les recherches de ce genre, je recommande surtout l'expérience suivante. On met le nœud d'une corde de piano ou de monocorde en contact avec les crins d'un petit pinceau; on ébranle la corde, et on en éloigne aussitôt après le petit pinceau. Si ce dernier a été fortement appuyé sur la corde, on entend le son harmonique correspondant, seul ou accompagné du son fondamental, mais avec une faible intensité. On ébranle de nouveau la corde en diminuant tou-

jours de plus en plus la pression du pinceau, qu'on finit par enlever complétement ; le son fondamental qui accompagne le son harmonique devient de plus en plus perceptible, jusqu'à ce qu'on arrive au son ordinaire de la corde résonnant librement. On obtient ainsi une série de transitions successives entre l'harmonique isolé et le son complexe, dans lesquelles l'oreille s'habitue à reconnaître facilement le premier. C'est au moyen de cette expérience qu'il m'est arrivé le plus souvent de démontrer l'existence des harmoniques à des auditeurs tout à fait inexpérimentés.

Il est plus facile de percevoir les harmoniques dans le son des instruments à cordes, de l'harmonium, des registres mordants de l'orgue, que dans celui des instruments à vent ou de la voix humaine ; ici, en effet, il n'est pas aussi facile d'émettre préalablement, avec une faible intensité, l'harmonique dont il s'agit, tout en lui conservant le même timbre. On arrive bientôt, cependant, avec quelque exercice, au moyen du son d'un piano, à guider l'oreille vers l'harmonique qu'il faut entendre. Par des raisons qui seront développées plus tard, ce sont les sons partiels de la voix humaine qu'il est relativement le plus difficile d'isoler. Cependant, Rameau avait déjà distingué les harmoniques de la voix, et cela, sans aucun secours artificiel (1). On peut faire l'expérience de la manière suivante : faites tenir à une voix de basse la note *mi* $\flat_1$ sur la voyelle *O;* puis, touchez faiblement le *si* $\flat_2$ du piano, troisième son partiel du *mi* $\flat_1$, et laissez-le s'éteindre, en fixant votre attention sur lui. En apparence, le *si* $\flat_2$ du piano se prolongera au lieu de s'éteindre, quoique vous abandonniez la touche, parce que l'oreille passe insensiblement du son du piano à l'harmonique correspondant de la voix, et prend ce dernier pour le prolongement du premier. Or, la touche étant abandonnée à elle-même, et l'étouffoir étant retombé sur la corde, il est impossible que celle-ci continue de résonner. Si on veut faire l'expérience sur le cinquième son partiel du *mi* $\flat_1$, c'est-à-dire sur le *sol* $_3$, il vaut mieux que le chanteur donne un *A*.

Les sphères résonnantes décrites dans le précédent chapitre, fournissent encore pour ces recherches, un très-bon moyen qui est applicable aux sons de tous les instruments de musique. Si on adapte à l'oreille le résonnateur qui correspond à un harmonique déterminé, au sol_2, par exemple, du son ut_1, et qu'on émette ce dernier, on entend le sol_2 considérablement renforcé. De ce qu'on entend et on distingue le sol_2 dans ces conditions, on ne peut encore conclure que l'oreille soit en état d'entendre le sol_2 dans le son ut_1, sans le secours de la sphère résonnant par influence. Mais on peut tirer parti de ce

(1) *Nouveau Système de musique théorique*, Paris, 1726, Préface.

renforcement, pour attirer l'attention de l'oreille sur le son qu'elle doit entendre. Si on éloigne ensuite peu à peu le résonnateur de l'oreille, le *sol*$_2$ s'affaiblit ; néanmoins l'attention, une fois appelée là-dessus, se fixe plus facilement sur la note en question, que l'observateur arrive à distinguer, même dans le son complexe, sans le secours d'aucun instrument. Les résonnateurs ne doivent donc servir ici qu'à appeler l'attention de l'oreille sur le son qu'elle doit entendre.

Quand on s'essaye souvent, dans ces conditions, à distinguer les harmoniques, on apprend à les reconnaître avec une facilité toujours croissante, et on finit même par n'avoir plus besoin d'aucun secours. Il faut toujours cependant une certaine concentration de l'attention pour analyser les sons au moyen de l'oreille seule ; aussi n'est-il guère possible, sans le secours des résonnateurs, de comparer avec exactitude différents timbres, surtout relativement aux harmoniques faibles. Au moins je dois avouer que mes recherches personnelles, pour découvrir les harmoniques de la voix humaine, et pour déterminer leurs variations dans les différentes voyelles, sont restées assez incertaines, jusqu'au moment où j'ai eu recours aux résonnateurs.

Nous arrivons maintenant à prouver, que l'oreille humaine décompose effectivement les sons suivant la loi des vibrations simples. Comme on ne peut comparer avec assez de précision les intensités de la sensation des divers sons, nous devons nous borner à établir que, si, dans la décomposition de la masse sonore en vibrations simples, telle que nous la fournit le calcul théorique ou le phénomène de l'influence, certains harmoniques font défaut, ce sont précisément ceux-là que l'oreille ne perçoit pas.

Ce sont encore les sons des cordes qui se prêtent le mieux à cette démonstration, parce que, suivant le mode d'ébranlement, suivant le point d'attaque, ils comportent de nombreuses modifications de timbre, et aussi, parce que c'est pour eux que l'analyse théorique ou expérimentale peut se faire le plus facilement, et de la manière la plus complète. Thomas Young a montré le premier (1) que, si on ébranle une corde, au moyen du doigt, la percussion, et nous pouvons ajouter de l'archet, en un point qui coïncide avec un nœud de l'un quelconque de ses harmoniques, on fait disparaître, du mouvement général de la corde, toutes les formes de vibrations simples qui ont un nœud au point considéré. Si la corde est ébranlée exactement en son milieu, tous les sons partiels pairs des vibrations simples disparaissent, parce qu'elles ont toutes un nœud au milieu de la corde. On obtient ainsi un

(1) *London philosophical Transactions*, 1800, t. I, p. 137.

son particulièrement creux ou nasillard. Si c'est au $\frac{1}{3}$ de la corde que se produit l'ébranlement, ce sont les vibrations correspondant aux troisième, sixième, neuvième sons partiels qui font défaut ; si c'est au $\frac{1}{4}$, ce sont celles des quatrième, huitième, douzième sons partiels, etc.

Cette conséquence de la théorie mathématique peut d'abord se vérifier, en analysant le son des cordes, au moyen des vibrations par influence des résonnateurs ou d'autres cordes. On peut facilement faire l'expérience sur le piano. Abaissez les deux touches de l'ut_1 et de l'ut_2, mais sans que les marteaux viennent frapper les cordes, de manière à lever seulement les deux étouffoirs, puis faites résonner la corde ut_1 en la grattant avec l'ongle. Si vous abandonnez la touche ut_1, la corde ut_2 continuera à résonner. Si on pince la corde ut_1 exactement au milieu, c'est-à-dire en plaçant le doigt en un point tel que, sous la percussion du marteau, le premier harmonique sorte seul et bien juste, alors seulement, la corde ut_2 ne vibrera pas par influence.

Si on place le doigt au $\frac{1}{3}$ ou aux $\frac{2}{3}$ de la corde ut_1, et qu'on frappe sur la touche, on entend l'harmonique sol_2 ; si on lève l'étouffoir du sol_2 du piano, cette note entre en vibrations. Si, au contraire, on pince la corde aux mêmes points, au $\frac{1}{3}$ ou aux $\frac{2}{3}$ de sa longueur, le sol_2 n'entre pas en vibrations, ce qu'il ferait pour un ébranlement de la corde ut_1 en tout autre point.

De même l'observation, au moyen des résonnateurs, montre que l'ut_1 disparaît du son de la corde ut_1 quand elle est ébranlée en son milieu ; que c'est le sol_2 qui fait défaut lorsque le point d'attaque est au $\frac{1}{3}$ ou aux $\frac{2}{3}$ de la longueur. L'analyse du son des cordes, par le phénomène de l'influence ou les résonnateurs, confirme donc complétement la règle établie par Thomas Young.

Pour les vibrations des cordes, nous avons un mode d'analyse encore plus direct que l'emploi des résonnateurs. En effet, si nous touchons légèrement, avec le doigt ou un pinceau de crin, une corde vibrante, nous étouffons toutes les vibrations simples qui n'ont pas de nœud au point touché. Mais, en revanche, toutes celles qui y présentent un nœud, ne sont pas étouffées, et subsistent seules. Supposons donc une corde mise en vibrations d'une manière quelconque. Si je veux savoir si la vibration, correspondant à la douzième du son fondamental, figure parmi les éléments dont le mouvement général de la corde est supposé formé, je n'ai qu'à toucher un des nœuds de cette

vibration, au $\frac{1}{3}$ ou aux $\frac{2}{3}$ de la longueur de la corde; aussitôt, tous les autres sons s'éteignent, et il ne restera que la douzième si elle existait préalablement. Si elle faisait aussi défaut, ainsi que tous ses harmoniques, le sixième, le neuvième, le douzième son partiels, le contact du doigt éteindrait complétement le son.

Abaissez la touche d'un piano, de manière à débarrasser la corde de son étouffoir. Pincez la corde en son milieu et touchez-la immédiatement au même point, vous éteindrez complétement le son, ce qui prouve que l'ébranlement au milieu n'a donné naissance à aucun des sons partiels pairs de la corde. Faites la même expérience au $\frac{1}{3}$ ou aux $\frac{2}{3}$ de la longueur; le son s'éteindra encore complétement, ce qui prouve que le troisième son partiel faisait défaut. Si on attaque la corde en tout autre point, on obtiendra le second son partiel en touchant la corde au milieu, le troisième, en la touchant au $\frac{1}{3}$ ou aux $\frac{2}{3}$ de sa longueur.

La concordance de ce système de démonstration avec les résultats de la preuve au moyen des vibrations d'influence, est aussi de nature à prouver expérimentalement, la proposition que nous avions émise dans le précédent chapitre, en nous fondant seulement sur les conséquences de la théorie mathématique, à savoir, que la vibration d'influence avait ou n'avait pas lieu, suivant que les vibrations simples correspondantes existaient ou non dans le mouvement composé. Dans l'expérience décrite en dernier, nous avons analysé le son d'une corde tout à fait indépendamment de la théorie de l'influence, et les vibrations simples des cordes sont caractérisées, sont reconnaissables, précisément par les points nodaux. Si, dans le phénomène de l'influence, les sons étaient décomposés en autre chose qu'en vibrations simples, cette concordance ne pourrait avoir lieu.

Après avoir donné les preuves expérimentales qui précèdent, de l'exactitude de la loi posée par Thomas Young, il ne nous reste plus qu'à analyser les sons des cordes au moyen de l'oreille seule, pour trouver ici la concordance la plus parfaite (1). Tant que nous pinçons ou que nous frappons la corde en un de ses nœuds, nous éteignons, aussi pour l'oreille, tous les harmoniques dont fait partie le nœud considéré, tandis qu'elle les entend si on attaque la corde en tout autre point. Ainsi, par exemple, si on pince la corde ut_1 au tiers

(1) Voir Brandt dans les *Annales de Poggendorff*, vol. CXII, p. 134, où le fait est démontré.

de sa longueur, on n'entend pas l'harmonique *sol*$_2$, tandis qu'il est très-net, si on s'écarte même à une petite distance de ce point. L'oreille décompose donc le son de la corde en éléments exactement identiques à ceux qui se distinguent par le phénomène de l'influence, c'est-à-dire en *sons simples*, suivant la définition qu'en a donnée Ohm. Cette expérience peut aussi servir à prouver, que ce n'est pas une illusion de l'imagination qui fait entendre les harmoniques, comme le croient quelquefois les gens qui les entendent pour la première fois; on ne les distingue, en effet, que s'ils existent réellement dans le son complexe. Cette expérience se prête même d'une manière toute particulière à rendre sensibles à l'oreille les harmoniques des cordes en général. Commencez par attaquer, l'un après l'autre, en mesure, le troisième et le quatrième son partiels d'une corde, en étouffant successivement le son aux nœuds correspondants, et priez l'auditeur de faire attention à l'espèce d'air qui se produit ainsi. Attaquez ensuite la corde aux mêmes points nodaux et dans le même rhythme, mais sans étouffer le son; vous aurez ainsi le même air sur les harmoniques, et l'auditeur le reconnaîtra facilement. Il faut naturellement, pour avoir le troisième son partiel, frapper la corde sur le nœud du quatrième, et réciproquement.

Au reste, le son d'une corde pincée mérite encore d'attirer l'attention, comme un exemple particulièrement frappant qui montre comment l'oreille décompose, en une longue série de sons partiels, un mouvement que l'œil et le dessin ne peuvent saisir que d'une manière beaucoup plus simple.

Une corde, écartée de sa position d'équilibre au moyen de l'ongle ou d'une pointe fine, prend, avant d'être abandonnée à elle-même, la forme représentée *fig.* 18, A. Elle passe ensuite par la série des formes, *fig.* 18, B, C, D, E, F, jusqu'à la forme G, renversement de A, puis revient à sa forme primitive en repassant par les mêmes intermédiaires. Elle oscille donc entre les formes A et G. Toutes ces formes sont, comme on voit, composées de trois lignes droites, et, si on voulait exprimer par des courbes la vitesse de chaque point, on obtiendrait des courbes analogues. La corde ne transmet immédiatement à l'air qu'une portion à peine appréciable de son mouvement; car une corde, dont les extrémités sont fixées d'une manière tout à fait invariable, par exemple à des chevalets métalliques insérés dans le mur de la chambre, donne un son à peine perceptible.

Le mouvement vibratoire de la corde ne se transmet à l'air que par celle de ses extrémités qui est fixée par un chevalet sur une table d'harmonie. Le son de la corde ne dépend donc essentiellement que du mouvement de cette extrémité et de la pression variable qu'elle exerce

sur la table d'harmonie. La valeur de cette pression, qui varie périodiquement avec le temps, est représentée dans la figure 19. La ligne *hh* doit correspondre à la pression exercée sur le chevalet par l'extrémité *a* de la corde quand celle-ci est au repos. Le long de *hh*, imaginons des longueurs figurant les temps, puis des lignes verticales reportées au-dessus et au-dessous de *hh*, représentant les augmentations ou les diminutions de la pression aux instants considérés. La pression de la corde sur la table d'harmonie varie donc, comme le montre la figure, entre un maximum et un minimum. La pression maxima dure quelque temps sans changer, puis est brusquement remplacée par la pression minima, qui reste de même constante un certain temps. Les petites lettres, de *a* jusqu'à *g*, correspondent aux instants où se produisent les formes diverses, de A jusqu'à G (*fig.* 18). C'est cette alternance entre une pression forte et une pression faible, qui produit le son dans la masse aérienne. On peut s'étonner, à juste titre, qu'un

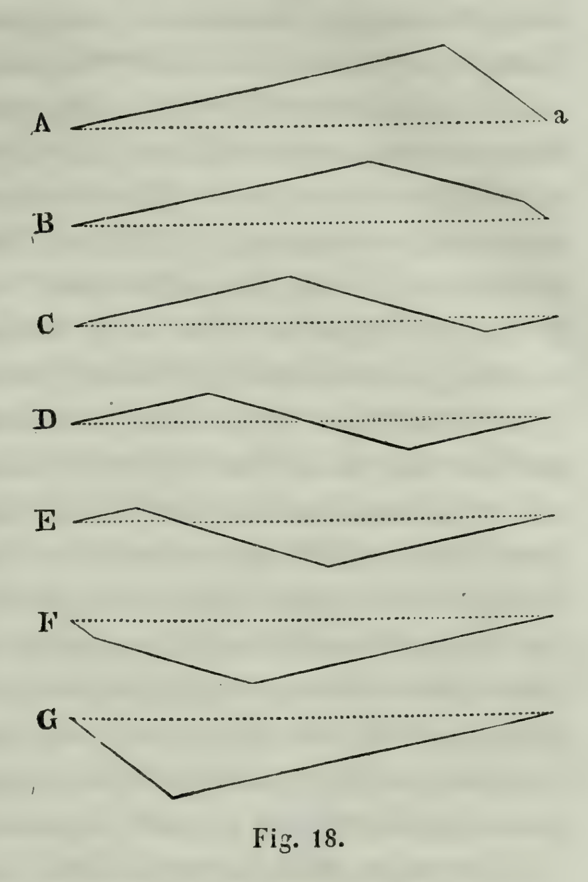


Fig. 18.

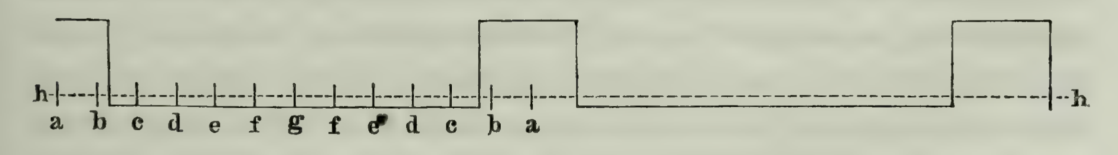


Fig. 19.

mouvement, déterminé par un phénomène aussi simple et aussi facile à saisir, soit décomposé par l'oreille en une somme si compliquée de sons partiels. L'action de la corde, sur la table d'harmonie, peut se représenter d'une manière aussi extraordinairement simple pour l'œil et la raison. Qu'est-ce que la simple ligne brisée de la figure 19 peut avoir à faire avec des lignes d'ondes qui, dans l'étendue de leur période, présentent de 3, 4, 5 jusqu'à 16 et plus d'éminences et de dépressions ? C'est là un des exemples les plus frappants, de la manière différente dont l'œil et l'oreille sont affectés par un même mouvement périodique.

Il n'y a point de corps sonore pour lequel on puisse calculer le mouvement dans des conditions variées, puis comparer le calcul avec la réalité, aussi complétement qu'on peut le faire pour les cordes. Dans les exemples qui vont suivre, on peut encore comparer les résultats fournis par la théorie à ceux de l'analyse opérée par l'oreille.

J'ai trouvé une méthode qui permet de produire dans l'air des vibrations simples pendulaires. Un diapason, qu'on ébranle par la percussion, ne donne point d'harmoniques, ou au moins, s'il en présente quelques traces, c'est lorsque l'intensité des vibrations est telle qu'elles ne suivent plus exactement la loi du pendule. En revanche, les diapasons donnent des sons accessoires très-élevés, non harmoniques, qui produisent le timbre particulier du diapason au moment de la percussion, et qui s'éteignent ensuite rapidement dans la plupart des cas. Si l'on tient entre les doigts un diapason qui résonne, le son ne se transmet que fort peu à l'air, et on ne l'entend qu'en approchant l'instrument tout près de l'oreille. Au lieu de le tenir entre les doigts, on peut aussi le monter sur une planchette fixe, un peu épaisse, sur la surface inférieure de laquelle on colle quelques morceaux de tubes en caoutchouc en guise de coussinets. Si l'on place la planchette sur une table, les tubes en caoutchouc sur lesquels elle repose ne transmettent pas à la table le mouvement vibratoire, et on n'entend pour ainsi dire pas le son du diapason.

Maintenant, qu'on approche des branches de ce dernier un tube en forme de flacon (1), rempli d'air, et résonnant à l'unisson du diapason lorsqu'on souffle dedans; l'air du tuyau vibrera par influence, ce qui renforcera considérablement le son du diapason à l'extérieur. Or, les sons accessoires aigus des tuyaux ne sont harmoniques ni avec le son fondamental, ni, en général, avec les sons accessoires, harmoniques ou non, des diapasons, ce qu'on peut d'ailleurs vérifier exactement dans chaque cas, si on recherche les sons accessoires du tuyau en soufflant plus fort dedans, et ceux des diapasons avec le secours de cordes vibrant par influence, d'après un procédé qu'on va décrire ci-dessous. Si un seul des sons partiels du diapason, le son fondamental, correspond à un son partiel du tuyau, c'est le seul qui soit renforcé par les vibrations d'influence, et le seul aussi qui se transmette à l'air ambiant et à l'oreille de l'observateur. L'étude du mouvement aérien, faite au moyen des résonnateurs, montre qu'en réalité, dans ce cas, le son fondamental résonne seul, et aussi que l'oreille toute seule n'entend

(1) Une fiole d'une capacité convenable; on peut facilement déterminer cette dernière d'une manière précise en versant de l'eau ou de l'huile. On peut encore faire usage d'un tube de carton, fermé à une extrémité et percé à l'autre d'un petit trou rond. Sur les dimensions des résonnateurs de ce genre, voir le supplément I à la fin du volume.

qu'un seul son dans ces conditions, c'est-à-dire le son fondamental commun au diapason et au tuyau, sans mélange d'autres sons partiels.

On peut encore débarrasser autrement de tout élément étranger le son d'un diapason, en reliant la tige de ce dernier à une corde sonore, et le plaçant à une distance telle du chevalet, que l'un des sons propres de la portion de corde comprise entre le diapason et le chevalet, soit à l'unisson du diapason. La corde vibre alors énergiquement, et transmet le son du diapason avec une grande intensité à la table d'harmonie et à l'air, tandis qu'on n'entend rien ou presque rien, tant que la portion de corde n'est pas à l'unisson du diapason. On peut facilement, de cette manière, trouver les longueurs de corde qui correspondent au son fondamental et aux sons partiels du diapason, et, par conséquent, déterminer avec précision la hauteur de ces derniers. Si on veut faire cette expérience avec des cordes ordinaires, homogènes dans toute leur longueur, l'oreille perçoit bien les sons accessoires inharmoniques du diapason, mais non les sons partiels harmoniques faibles qui peuvent se faire entendre dans des vibrations énergiques. Si on veut diriger l'expérience de manière à déterminer dans l'air des vibrations purement pendulaires, il est plus avantageux de charger un peu un point de la corde, ne fût-ce que d'une goutte de cire à cacheter fondue. On rend ainsi les sons partiels supérieurs de la corde elle-même inharmoniques avec le son fondamental, et on détermine ainsi, sur la corde, les points où il faut attacher le diapason, pour rendre perceptibles le son fondamental ou ses octaves supérieures, si elles existent.

Dans la plupart des autres cas, l'analyse mathématique des mouvements vibratoires n'est pas encore assez avancée, pour nous permettre de déterminer avec sûreté les harmoniques qui doivent se faire entendre, et l'intensité qu'ils doivent avoir. Pour les plaques circulaires et les membranes tendues qu'on ébranle par percussion, on pourrait arriver par la théorie, mais les sons accessoires non harmoniques sont si nombreux et si rapprochés, que la plupart des observateurs ne pourraient parvenir à les distinguer.

Pour les verges élastiques, au contraire, les sons partiels sont très-éloignés, inharmoniques, et peuvent facilement être perçus individuellement par l'oreille. En représentant par 1 le nombre de vibrations du son fondamental, que nous désignerons par ut_0, les sons partiels d'une verge libre à ses deux extrémités sont :

	NOMBRE DE VIBRATIONS.	EN NOTATION USUELLE.
Premier son.........	1,0000	ut_0
Deuxième son.......	2,7576	$fa\sharp_1 + 0,2$
Troisième son.......	5,4041	$fa_2 - 0,1$
Quatrième son.......	13,3444	$la_3 - 0,1$

Les notes sont prises dans la gamme tempérée usuelle, et les fractions représentent les subdivisions du ton.

Dans le cas où on ne peut analyser théoriquement le mouvement, nous pouvons toujours, au moyen de résonnateurs ou d'autres cordes vibrant par influence, décomposer individuellement chaque son complexe, et comparer les résultats de cette décomposition, telle qu'elle se fait par les lois de la vibration par influence, avec ceux fournis par l'oreille privée de tout secours. Celle-ci est alors naturellement beaucoup moins sensible qu'armée du résonnateur, et il est souvent difficile, sans lui, de reconnaître, parmi d'autres sons plus forts, ceux que le résonnateur donne avec peu d'intensité. En revanche, aussi loin qu'ont pu s'étendre mes recherches, elles concordent toutes sur ce point que l'oreille, à elle seule, perçoit tous les sons renforcés par le résonnateur, et ne distingue, au contraire, aucun harmonique non accusé par cet instrument.

J'ai fait notamment, sous ce rapport, sur la voix humaine et l'harmonium, beaucoup d'expériences qui confirment toutes la règle précédente.

Les expériences qui viennent d'être décrites, prouvent directement la proposition avancée et défendue par G.-S. Ohm, à savoir : que *l'oreille n'a la sensation d'un son simple que lorsqu'elle rencontre une vibration pendulaire, et qu'elle décompose tout autre mouvement périodique de l'air, en une série de vibrations pendulaires qui correspondent chacune à la sensation d'un son simple.*

Si donc, conformément à notre précédente définition, nous donnons le nom générique de *son* ou *son complexe* à la sensation produite dans l'oreille par un mouvement périodique de l'air, et de *son partiel* à la sensation correspondant à un mouvement simple pendulaire, on peut dire, en général, que la sensation d'un son complexe est composée de la sensation de plusieurs sons partiels. En particulier, nous désignons par *son complexe* le mouvement vibratoire produit par un seul corps sonore, tandis que celui produit par plusieurs instruments résonnant simultanément prend le nom d'accord. Par conséquent, lorsqu'un instrument de musique quelconque, violon, trompette, orgue ou voix humaine, donne une note, c'est un *son complexe*, strictement parlant. En réalité, la plupart du temps le son fondamental est plus fort que les harmoniques ; aussi est-ce généralement d'après lui qu'on apprécie la hauteur du son total. Ce n'est que dans un petit nombre de cas, par exemple, avec les diapasons associés à des tubes résonnants, qu'on obtient des sons absolument simples ; les tuyaux bouchés de l'orgue, avec peu de vent, donnent des sons presque entièrement débarrassés d'harmoniques, et accompagnés seulement de frôlements.

On sait que cette réunion de plusieurs sons partiels en un seul son complexe, réalisée par la nature dans la plupart des instruments de musique, a été imitée artificiellement par des combinaisons mécaniques particulières. Les sons des tuyaux d'orgue sont relativement pauvres en harmoniques; il en résulte que pour former un registre d'un timbre pénétrant et d'une grande puissance, les grands tuyaux (registre principal et les grands tuyaux bouchés) ne suffisent pas, parce que leur son est trop doux, trop pauvre en harmoniques; quant aux petits tuyaux (Violon principal et Quintaton), leur son est plus mordant, mais aussi plus faible. Dans ces conditions, notamment pour accompagner le chant d'Église, on fait usage des *jeux de fourniture.* Dans ce registre, chaque touche est associée à une série plus ou moins grande de tuyaux, qu'elle ouvre simultanément, et qui donnent le son fondamental, réuni à un certain nombre des premiers harmoniques du son complexe de la note considérée.

Le plus ordinairement, on réunit le son fondamental à l'octave et quelquefois à la douzième. Les fournitures composées (Cornets) donnent les six premiers sons partiels, c'est-à-dire, indépendamment des deux octaves du son fondamental et de la douzième, la tierce supérieure et l'octave de la douzième. C'est la série des harmoniques, prolongée aussi loin qu'elle peut l'être sans sortir de l'accord parfait. Mais pour que ces jeux de fournitures ne deviennent pas insupportablement criards, il est nécessaire que les sons fondamentaux de chaque note soient renforcés par d'autres séries de tuyaux. Car, dans tous les sons musicaux usuels fournis par la nature, l'intensité des sons partiels diminue avec la hauteur. C'est une chose qui doit être prise en considération, quand on cherche à imiter un timbre au moyen des fournitures. Jusqu'à présent ces jeux étaient un objet de scandale pour la théorie musicale qui ne connaît que les sons fondamentaux; néanmoins les nécessités de la pratique obligeaient les organistes et les facteurs d'orgue à les conserver; employés à propos, ils sont d'un très-grand effet musical. Leur emploi se trouve donc parfaitement justifié par la nature même des choses. Le musicien doit se représenter les sons de tous les instruments comme analogues à ceux des jeux de fourniture; l'influence considérable de cette composition du son sur la construction de nos gammes et de nos accords, sera mise en évidence dans les dernières parties de ce livre.

Nos recherches nous ont conduit à une appréciation du rôle des harmoniques, qui s'écarte un peu des idées ayant cours chez les musiciens, et même chez les physiciens; aussi devons-nous aller au-devant des objections qu'on pourrait nous faire. On connaissait bien l'existence des harmoniques, mais presque uniquement dans certains sons,

notamment dans ceux des cordes, où des circonstances particulières en favorisaient l'observation. Mais, jusqu'ici, dans les ouvrages de physique ou de musique, ils n'apparaissent que comme un phénomène singulier, fortuit, d'une faible intensité, une sorte de curiosité, qu'on a bien citée à l'occasion pour appuyer, dans une certaine mesure, l'opinion que notre accord parfait est fourni par la nature elle-même, mais qui, en somme, est restée assez dans l'ombre. A cela nous répondrons, et nous prouverons dans les chapitres suivants, que les harmoniques sont un élément commun à presque tous les sons, sauf un petit nombre d'exceptions déjà énumérées, et qu'il en faut absolument un certain nombre pour constituer un bon timbre musical. Enfin on les a considérés à tort comme faibles parce qu'ils sont difficiles à observer, tandis qu'au contraire, dans quelques-uns des meilleurs timbres musicaux, l'intensité des harmoniques graves ne le cède pas beaucoup à celle du son fondamental.

On peut encore facilement s'assurer de l'exactitude de cette dernière proposition, par des expériences sur les sons des cordes. Si l'on frappe une corde de piano ou de monocorde, et qu'immédiatement après, on la touche légèrement avec le doigt en un point nodal, pendant un instant, le son partiel dont le nœud a été touché, conserve seul une intensité invariable, tandis que tous les autres s'éteignent. On peut aussi laisser le doigt sur le nœud pendant l'attaque, et on n'obtient alors que le son partiel considéré, au lieu du son total de la note. Par les deux procédés on peut se convaincre, que les premiers harmoniques, surtout l'octave et la douzième, ne sont pas du tout faibles et difficiles à entendre, mais qu'ils ont, au contraire, une intensité très-considérable. On peut quelquefois évaluer numériquement l'intensité des harmoniques, comme on le verra dans le prochain chapitre. Pour les sons des autres instruments que les instruments à cordes, la démonstration n'est pas aussi facile à faire, parce qu'on ne peut faire parler isolément les harmoniques; on peut toujours cependant reconnaître, au moyen des résonnateurs, quelle est à peu près l'intensité des harmoniques, en donnant la note qui leur correspond sur le même instrument ou sur un autre, de manière à obtenir la même intensité de résonnance dans le résonnateur.

La difficulté qu'on éprouve à entendre les harmoniques, n'est pas une raison de conclure à leur faible intensité, car cette difficulté ne dépend pas de la force des sons partiels ; elle tient, au contraire, à des circonstances d'une tout autre nature, que les récents progrès de la physiologie des organes des sens ont placées pour la première fois dans leur véritable jour. A cette difficulté de percevoir les harmoniques, se rattachent des objections que Seebeck a opposées à la loi de

l'analyse des sons établie par Ohm (1), et il est possible qu'un grand nombre de mes lecteurs, étrangers à la physiologie des autres sens, notamment de la vue, inclinent à adopter les idées de Seebeck. Je dois donc appuyer davantage sur ce différend, et sur les particularités de nos perceptions sensorielles dont dépend la solution de la question.

Bien qu'expérimentateur et observateur distingué en acoustique, le savant Seebeck n'était pas toujours en état de reconnaître la présence des harmoniques, là où elle était réclamée par la loi de Ohm. Mais aussi, empressons-nous de l'ajouter, il n'avait pas eu recours aux méthodes précédemment décrites, pour diriger l'attention de l'oreille sur les sons partiels en question. Et, quand il les entendait, ils lui paraissaient trop faibles, comparés à l'intensité théorique qu'ils auraient dû avoir. Il en concluait que la définition donnée par Ohm des sons simples n'était pas assez large, et que, non-seulement les vibrations pendulaires mais aussi d'autres vibrations, pourvu que leur forme ne s'écartât pas trop de la forme pendulaire, étaient susceptibles de donner à l'oreille la sensation d'un son simple, mais avec des variations dans le timbre. Il prétendait, par conséquent, que lorsqu'un son est formé de plusieurs sons simples, une partie de l'intensité des harmoniques se fond avec celle du son fondamental qu'elle renforce, et que le peu qui en reste produit encore la sensation d'un harmonique. Il n'a point déterminé d'une manière précise les formes de vibrations donnant l'impression d'un son simple ou complexe. Nous n'avons pas besoin de nous étendre ici sur les expériences de Seebeck, à l'appui de son système. Elles n'ont d'autre but que de produire des sons pour lesquels on peut, soit calculer théoriquement l'intensité des harmoniques, soit rendre les sons partiels isolément appréciables. Pour arriver à ce dernier résultat notamment, il a fait usage de la sirène; nous venons d'indiquer comment on peut y parvenir au moyen des cordes. Seebeck prouve, dans certains cas isolés, que les vibrations simples qui correspondent aux harmoniques, ont une intensité considérable, tandis que, dans les sons composés, les harmoniques ne s'entendent pas, ou au moins ne s'entendent que difficilement. Nous avons déjà expliqué ce fait dans le cours de ce chapitre; il peut être absolument exact pour un observateur donné, surtout s'il ne fait pas usage des vraies méthodes pour l'observation des harmoniques, tandis qu'un autre, ou même le premier dans de meilleures conditions, entendra parfaitement bien les sons partiels.

Les harmoniques sont, en effet, un phénomène qui se rattache à la *sensation* pure et simple de l'ouïe; la fusion d'une série d'harmoni-

(1) *Annales de Poggendorff*, vol. LX, p. 449; vol. LXIII, p. 353 et 368. — Ohm, *ibid.*, vol. LIX, p. 513; vol. LXII, p. 1.

ques en un seul son, telle qu'elle est réalisée sur n'importe quel instrument, rentre, non dans le domaine des sensations, mais dans celui des *perceptions*. Dans l'Introduction, j'ai déjà appelé l'attention sur cette différence. Nous appelons *sensations* les impressions produites sur nos sens, en tant qu'elles nous apparaissent seulement comme des états particuliers de notre corps (surtout de nos appareils nerveux); nous leur donnons au contraire le nom de *perceptions*, lorsqu'elles nous servent à nous former des représentations des objets extérieurs. Quand nous reconnaissons un certain mouvement vibratoire comme représentant le son d'un violon, c'est là une perception; nous concluons à l'existence d'un instrument déterminé qui donne ordinairement des sons du même genre. Quand, au contraire, nous cherchons à décomposer un son complexe en sons partiels, c'est là un acte de sensation pure. Car, à un son partiel isolé ne correspond aucun corps sonore déterminé, aucune portion d'un corps vibrant; séparé des autres éléments d'un même son, l'harmonique n'est autre chose qu'un élément de notre sensation. Quand nous fondons, comme dans ce livre, des théories scientifiques sur nos sensations, nous pouvons avoir un grand intérêt à dégager ce phénomène; mais, dans l'emploi journalier de l'oreille, rien ne nous invite à le faire, car nos sensations n'ont de valeur pour nous, que si elles nous permettent de reconnaître l'existence de phénomènes se produisant dans le monde extérieur qui nous environne. Ce dernier objet est suffisamment rempli par la sensation des sons complexes; leur décomposition en sons partiels, si nous en avions conscience, loin de nous aider, nous gênerait au contraire beaucoup.

Dans l'usage que nous faisons des organes de nos sens, l'exercice et l'expérience jouent un rôle beaucoup plus important qu'on n'est ordinairement porté à le croire, et comme, ainsi que nous venons de le faire remarquer, nos sensations n'ont d'importance pour nous qu'autant qu'elles nous mettent à même de connaître exactement le monde extérieur, notre attention ne s'applique ordinairement à l'observation de ces sensations, que juste autant qu'il est nécessaire pour atteindre à ce but. Nous sommes seulement trop portés à supposer que nous devons avoir conscience de tout ce que nous sentons, de tout ce qui est contenu dans notre sensation. Cette manière de voir toute naturelle repose seulement sur ce fait, qu'en réalité nous avons toujours, immédiatement et sans effort, conscience de ce qui nous intéresse dans nos sensations pour le but pratique que nous poursuivons, la connaissance exacte du monde extérieur, et cela, parce que, pendant notre vie entière, chaque jour et à toute heure, nous avons exercé nos organes dans ce sens, nous avons rassemblé des expérien-

ces dans cette vue. L'influence de l'exercice se manifeste même, en restant dans le cercle des sensations qui correspondent aux objets extérieurs.

On sait que le peintre peut distinguer les couleurs, la répartition de la lumière, avec beaucoup plus de finesse et de promptitude qu'un œil peu exercé à ce genre d'études, que le musicien et le facteur d'instruments apprécient facilement et sûrement des différences de hauteur et de timbre, qui n'existent même pas pour une oreille profane, que, même dans le domaine inférieur de l'art culinaire et de la dégustation, c'est surtout l'exercice et la comparaison qui assurent la supériorité. L'habitude prend encore une valeur beaucoup plus frappante, quand nous arrivons à des sensations dues uniquement à des phénomènes qui ne se passent que dans l'intérieur de nos organes et de notre système nerveux, qui ne correspondent point aux choses extérieures et à leur action sur nous, qui, par conséquent, n'offrent aucun intérêt pour la connaissance du monde extérieur. La physiologie moderne des organes des sens a appris à connaître une foule de phénomènes de ce genre, dont la découverte est due en partie au hasard, en partie au talent d'observation de certaines natures privilégiées, comme Gœthe et Purkinje. Ces phénomènes, auxquels on donne le nom de *subjectifs*, sont extraordinairement difficiles à découvrir, et, une fois qu'ils sont trouvés, ils réclament presque toujours des moyens particuliers pour fixer l'attention de l'observateur sur le phénomène en question, en sorte qu'il est encore très-difficile de retrouver ce dernier, même en connaissant déjà la description du premier observateur. Ainsi, non-seulement nous ne nous exerçons pas à observer ces apparences subjectives, mais même nous sommes très-exercés à en faire continuellement abstraction, parce qu'elles nous gêneraient dans l'observation du monde extérieur. Ce n'est que quand leur intensité devient assez grande pour entraver cette observation, que nous commençons à les remarquer, ou bien qu'ils deviennent le point de départ d'illusions dans les rêves ou dans le délire.

Je me bornerai ici à rappeler, à titre d'exemples, quelques cas de l'optique physiologique qui sont assez connus. Ce qu'on appelle les *mouches volantes*, existe dans tous les yeux; ce sont des fibres, des corpuscules, des gouttelettes qui flottent dans l'humeur vitrée de l'œil, projettent leur ombre sur la rétine, et apparaissent dans le champ de la vision, comme des images obscures mobiles ; on les voit facilement, surtout lorsqu'on regarde avec attention une vaste surface éclairée ne présentant pas d'autre contour, par exemple, la voûte céleste. La plupart des personnes dont l'attention n'a pas été particulièrement appelée là-dessus, ne remarquent ordinairement ce phénomène que

quand leurs yeux deviennent malades, et que, par suite, ils commencent à observer avec plus de soin les symptômes subjectifs. Elles se plaignent alors d'ordinaire que les mouches volantes sont venues avec la maladie; et cela amène souvent les patients à se tourmenter beaucoup de ces innocents phénomènes, à les suivre avec attention. Ils ne veulent pas croire, même lorsqu'on le leur affirme, que les mêmes images ont existé de tout temps chez eux, ainsi que dans tout œil sain. J'ai même connu un vieux monsieur qui, obligé de couvrir un de ses yeux accidentellement malade, s'aperçut pour la première fois, et non sans grande frayeur, qu'il était complétement aveugle de l'autre œil; par le fait, c'était un genre de cécité qui avait dû se produire des années avant qu'on la remarquât.

Qui croirait, sans en avoir fait l'expérience, qu'en fermant un œil, il y a, non loin du centre du champ visuel qu'embrasse le second œil encore ouvert, une lacune dans laquelle nous ne voyons rien, et que nous ne pouvons remplir que par l'imagination, ce qu'on appelle la *tache aveugle* ou *punctum cæcum?* Mariotte, qui découvrit ce phénomène à la suite de spéculations théoriques, excita un grand étonnement à la cour du roi Charles II d'Angleterre, en faisant cette expérience, qu'on varia de différentes manières à titre d'amusement. Par le fait, cette lacune est assez grande pour qu'on puisse y faire entrer onze fois le diamètre de la pleine lune, et pour qu'un visage humain placé à une distance de six ou sept pieds puisse y disparaître complé- ement. Mais, dans l'usage ordinaire, on ne fait pas du tout attention à cette lacune du champ de la vision, parce que nous faisons constamment errer notre regard, et que nous le dirigeons toujours sur les objets qui nous intéressent. Par conséquent, les objets qui éveillent notre attention sur le moment, n'arrivent jamais dans la lacune du champ de la vision; aussi la tache aveugle n'a-t-elle ordinairement aucune raison d'attirer notre attention. Nous sommes obligés de fixer le regard sur un objet, puis de placer un second petit objet dans la région de la tache aveugle, et de nous efforcer de voir ce dernier sans changer notre point de fixation, ce qui fait extraordinairement violence à nos habitudes ; beaucoup de personnes même ne peuvent y parvenir. C'est alors seulement que nous voyons disparaître le second objet, et que nous nous prouvons à nous-mêmes l'existence de cette lacune.

Enfin je rappellerai ici les images doubles dans la vision binoculaire ordinaire. Toutes les fois que nous fixons un point avec les deux yeux, tous les objets plus éloignés ou plus rapprochés que le point considéré, apparaissent comme doubles. Il suffit d'une observation un peu plus attentive pour le reconnaître sans difficulté. Nous pouvons en conclure

que pendant toute notre vie, nous avons constamment vu double la portion de beaucoup la plus grande du monde extérieur; il y a cependant beaucoup de personnes qui n'en savent rien, et qui sont très-étonnées lorsqu'on leur fait remarquer la chose pour la première fois. Mais, en réalité, nous n'avons jamais vu doubles les objets sur lesquels était dirigée notre attention à un moment donné, car nous les fixons toujours avec les deux yeux. Par conséquent, dans l'expérience de tous les jours, notre attention était toujours détournée des objets qui paraissent doubles à un moment donné, et par suite, nous ne savons rien sur eux. Nous sommes obligés de nous proposer un nouveau but en dehors de nos habitudes, nous devons commencer par explorer les parties latérales du champ visuel, non pour apprendre à connaître les objets qui s'y trouvent, mais pour analyser nos propres sensations, avant de constater le phénomène.

La difficulté qu'offre l'observation de sensations subjectives ne correspondant à aucun objet dans le monde extérieur, se rencontre au même degré dans l'analyse de sensations composées correspondant à un objet simple, non composé lui-même. C'est précisément le cas des sensations produites par le son. Si, toutes les fois que nous avons entendu le son d'un violon, il a toujours éveillé, dans notre oreille, la sensation d'une même somme de sons partiels, cette somme finit par devenir, dans notre sensation, le *symbole complexe* du son d'un violon ; une autre combinaison devient le signe sensoriel du son d'une clarinette, etc. Plus nous avons entendu souvent une combinaison de ce genre, plus nous sommes habitués à la considérer comme un tout, et plus il est difficile de l'analyser par une observation immédiate. A mon avis, c'est là une des principales raisons qui rendent si difficile la décomposition des sons de la voix humaine. Dans le domaine des autres sens, on rencontre de même la fusion de plusieurs sensations en un tout simple, qui parvient seul jusqu'à la perception consciente.

Nous trouvons encore ici des exemples intéressants dans l'optique physiologique. Nous nous représentons la forme physique d'un objet voisin, grâce à la fusion de deux images différentes, formées par l'objet dans chaque œil, et dont la différence tient à ce que les deux yeux ne sont pas placés au même point de vue ; ils donnent donc de l'objet deux perspectives un peu différentes. Avant l'invention du stéréoscope, on ne pouvait que supposer qu'il en était ainsi ; mais, grâce à cet instrument, on peut facilement s'en convaincre à chaque instant. Dans le stéréoscope, nous *composons* deux dessins plans, les deux perspectives fournies par les deux yeux, de façon que chaque œil voie à la place convenable l'image qui lui revient, et nous obtenons ainsi la représentation d'un corps à trois dimensions, tout aussi complète, tout aussi

vivante que si nous avions l'objet devant les yeux. Sans doute, une fois avertis, nous pouvons, en fermant tantôt un œil, tantôt l'autre, reconnaître ces différences, au moins si elles ne sont pas trop faibles dans les images fournies par l'objet lui-même; mais, pour la représentation stéréoscopique de la profondeur, il suffit d'avoir des images qui diffèrent si extraordinairement peu l'une de l'autre, qu'il est à peine possible, même par une comparaison minutieuse, d'en apprécier les différences. En tout cas, quand nous considérons les objets physiques sans parti pris et comme à l'ordinaire, nous ne songeons nullement que la représentation que nous en avons, est formée par la fusion de deux vues perspectives, et que, par elle-même, cette représentation est d'une tout autre nature que chacune des images planes considérée en soi. Ici, il y a donc fusion des deux sensations différentes éprouvées par chaque œil en une troisième, toute différente des deux autres, et qui représente l'objet, exactement comme les sons partiels se fondent pour représenter le son d'un instrument déterminé. Et, de même que nous apprenons à séparer les sons partiels d'une corde, en les faisant résonner, d'abord isolément au moyen des points nodaux, de même aussi nous apprenons à distinguer les images des deux yeux, une fois que nous avons fermé tantôt un œil, tantôt l'autre.

Il y a des cas encore plus compliqués où un grand nombre de sensations doivent se combiner, de manière à servir de base à une perception tout à fait simple. Si, par exemple, nous reconnaissons qu'un objet que nous voyons est situé dans une certaine direction, il faut d'abord nous rendre compte qu'une portion de nos fibres nerveuses optiques, est seule frappée par la lumière de l'objet, dont la position se détermine ainsi par rapport à l'œil. Nous devons apprécier ensuite exactement la position des yeux dans la tête, par le sentiment des mouvements exécutés par les muscles des yeux, enfin la position de la tête relativement au corps, par le sentiment des mouvements exécutés par les muscles du cou. Dès qu'un de ces éléments n'est fourni qu'imparfaitement, nous commettons des erreurs dans l'appréciation de la position des objets situés dans le champ du regard. Si nous modifions la direction de la lumière de l'objet, en mettant un prisme devant l'œil, et en la faisant ainsi arriver sur d'autres fibres nerveuses, ou si nous pressons latéralement la prunelle, de manière à entraver le libre jeu des muscles de l'œil, nous pouvons arriver à démontrer que les sensations de ces différents organes doivent concourir à former la perception simple de la position de l'objet. Mais il serait absolument impossible de déduire immédiatement cette proposition de l'impression sensorielle produite par l'objet. Il y a plus ; même après avoir fait toutes ces expériences, après nous être assurés de toutes les ma-

nières de la façon dont se passent les choses, notre observation directe, spontanée, n'en a nullement conscience (1).

Ces exemples doivent suffire à démontrer toute l'importance du rôle que jouent la direction de l'attention et l'habitude dans l'observation faite au moyen de nos sens. Le problème ordinairement posé à l'oreille par le concours de plusieurs sons, consiste à distinguer chacun des sons qui appartiennent à des corps sonores ou à des instruments distincts. Ce n'est que dans ces limites que l'analyse au moyen de l'oreille présente un intérêt objectif. Nous désirons savoir, si plusieurs personnes parlent ensemble, ce que dit chacune d'elles, si plusieurs instruments et des voix jouent ensemble, quelle est la mélodie exécutée séparément par chaque partie. Au contraire, en poussant plus loin l'analyse, en séparant chaque son en sons partiels, bien que cette opération puisse être exécutée par les mêmes moyens, les mêmes activités de l'oreille, nous n'apprendrions rien de nouveau sur les sources sonores ; nous serions plutôt trompés sur leur nombre. Aussi nous bornons-nous, d'ordinaire, à demander à notre attention de décomposer la masse sonore en sons de divers instruments, tout en lui défendant d'aller plus loin et de décomposer les sons en sons partiels. Nous sommes aussi exercés à la première opération que peu exercés à la seconde.

Un grand nombre de circonstances nous viennent en aide, pour distinguer les sons émanant de sources différentes, et, au contraire, pour fondre en un seul les sons partiels émanant de la même source. Quand un son succède à un autre, le second se prolongeant pendant que le premier s'éteint, la distinction est déjà facilitée par la succession même. Nous avons appris à connaître isolément le premier son, et, par suite, nous savons aussi ce que, dans l'ensemble, nous devons mettre à son compte. Mais, même dans la musique à plusieurs parties se mouvant dans le même rhythme, l'attaque du son par les diverses parties vocales ou instrumentales, le mode de renforcement, la sûreté dans la tenue, la manière de faire cesser le son, sont autant d'éléments qui diffèrent un peu en général. Les sons du piano, par exemple, se produisent brusquement par la percussion, et, par suite, présentent la plus grande intensité dans le premier moment, puis diminuent rapidement; ceux des instruments de cuivre, au contraire, se posent assez difficilement, et ont besoin d'un temps appréciable pour développer toute leur force. Les sons des instruments à archet se distinguent par leur extrême facilité à se mouvoir, mais, quand le jeu ou l'instrument ne sont pas absolument parfaits, ils présentent de

(1) Voir l'*Optique physiologique* du même auteur ; traduction Javal et Klein.

très-petites interruptions qui éveillent dans l'oreille le sentiment du raclement, comme on le décrira avec plus de détails dans l'analyse du son du violon. Par conséquent, quand des instruments de ce genre jouent ensemble, il y a des moments où c'est tantôt, l'un tantôt l'autre des sons qui domine, et qui, par suite, est facilement distingué par l'oreille. Au reste, dans les morceaux bien écrits à plusieurs parties, on a pris à tâche de faciliter à l'oreille la distinction des sons. Dans la musique polyphone proprement dite, où chaque partie a un mouvement mélodique distinct, on est surtout arrivé à donner de la clarté à la marche des voix, en les faisant se suivre les unes les autres dans un rhythme différent, sur des temps différents de la mesure; ou bien, quand cela n'a pas lieu, ou seulement dans une proportion plus restreinte, comme dans les anciens *chorals* à quatre voix, l'ancienne règle veut, autant que possible, que trois des parties n'avancent que d'un degré, quand la quatrième en franchit plusieurs. La faible variation de hauteur rend plus facile à l'oreille la constatation de l'identité de chaque partie.

Dans la décomposition des sons en sons partiels, ces secours font défaut. Quand un son commence, tous ses sons partiels commencent en même temps avec la même force ; s'il enfle, ils enflent en général tous régulièrement; s'il cesse, ils cessent tous en même temps. On n'a donc pas, la plupart du temps, occasion d'entendre ces sons partiels isolément et en eux-mêmes. C'est tout à fait de la même manière que se fondent, dans un jeu de fournitures, sur l'orgue, tous les sons partiels qui correspondent à la même touche, et qui se meuvent exactement comme le son fondamental dans la mélodie.

En outre, les sons de la plupart des instruments sont encore accompagnés de petits bruits caractéristiques irréguliers; je rappellerai ici le raclement et le frottement de l'archet sur le violon, le frôlement de l'air dans les flûtes et les tuyaux d'orgue, le ronflement des instruments à anche, etc. Ces particularités aident beaucoup à distinguer, dans une masse sonore, les sons des instruments que nous savons par avance associés à ces petits bruits caractéristiques. Ce signe distinctif fait naturellement défaut aux sons partiels d'un son complexe donné.

Nous ne devons donc pas nous étonner que la résolution des sons en harmoniques ne soit pas tout aussi facile pour l'oreille, que la décomposition d'un ensemble instrumental en ses éléments principaux; nous ne devons pas être surpris qu'une oreille, même exercée, ait besoin d'une assez grande attention pour résoudre le problème en question.

Il est aussi facile de comprendre, que les moyens auxiliaires précé-

demment énumérés, ne suffiront pas toujours à séparer exactement les différents sons, que, notamment pour des sons tenus régulièrement, dont l'un peut être considéré comme l'harmonique de l'autre, le jugement peut hésiter. Et il en est ainsi en réalité. Ohm a fait, à ce sujet, une expérience très-concluante avec les sons du violon. Mais il vaut beaucoup mieux la faire avec des sons simples, par exemple, ceux des tuyaux bouchés de l'orgue. Ce qu'il y a de mieux, c'est de faire usage de bouteilles de verre de la forme représentée figure 20, dans lesquelles on souffle ; il est facile de se les procurer et de les adapter à l'expérience. Au moyen de la tige *c*, on fixe à la bouteille un tube *a* de gutta-percha, dans une position convenable. L'orifice du tube qui aboutit à la fiole, est préalablement ramolli dans l'eau chaude, et aplati, de manière à présenter une fente étroite, par laquelle l'air passe dans le goulot de la bouteille. Si le tube est associé à une soufflerie au moyen d'un tuyau en gomme, on obtient un son sourd, analogue à la voyelle OU, encore plus débarrassé d'harmoniques que le son d'un tuyau bouché, et accompagné seulement d'un petit frôlement de l'air. Il est plus facile, dans ces conditions, au moins à ce que je trouve, de maintenir la hauteur constante pour de petites variations dans la force du vent, qu'on ne pourrait le faire avec des tuyaux bouchés. On fait baisser le son en couvrant en partie l'orifice d'une petite plaque en bois ; on le fait monter en remplissant la fiole d'huile ou de cire fondue, et on peut ainsi obtenir à son gré de petites variations dans la hauteur. J'avais accordé une grande fiole en *si* $\flat_1$, une autre petite en *si* $\flat_2$, et je les avais montées sur une même soufflerie, de manière à pouvoir les faire parler à la fois. Elles donnent ainsi un *si* $\flat_1$, comme la grande fiole, mais avec le timbre de la voyelle O. En pressant alternativement sur l'un ou sur l'autre des tubes de caoutchouc, de manière à entendre les deux sons l'un après l'autre, j'arrivais encore à les distinguer lorsqu'elles résonnaient ensemble, mais pas pendant longtemps; peu à peu la note aiguë se fondait dans la note grave. Cette fusion a lieu même si le son aigu est le plus fort. Dans cette fusion, qui arrive peu à peu, le changement de timbre est caractéristique.



Fig. 20.

Si l'on a donné d'abord la note haute, puis qu'on la fasse suivre de la note grave, on commence par entendre, à ce que je trouve, le son aigu encore avec toute sa force ; puis la note grave sonne avec son timbre naturel, comme un OU. Mais peu à peu, comme on perd le souvenir du premier son isolé, celui-ci s'affaiblit, perd de sa netteté, tandis que l'autre se renforce visiblement, et on a un *O*. Ohm a observé aussi sur le violon cet affaiblissement de la note aiguë et ce renforcement de la note grave ; cependant, comme le remarque Seebeck, les choses ne se passent pas toujours ainsi, probablement selon que le souvenir du son entendu isolément est plus ou moins vif, et que les deux sons se succèdent avec plus ou moins de régularité. Mais quand l'expérience réussit, elle fournit la meilleure démonstration possible de l'hypothèse, qu'il ne s'agit essentiellement ici que des diverses activités de l'attention. Dans les sons obtenus au moyen des fioles, indépendamment du renforcement de la note inférieure, le changement de timbre est très-net, et marque bien l'essence du phénomène ; dans les sons mordants du violon, il est moins frappant.

Ohm et Seebeck invoquent également cette expérience à l'appui de leurs hypothèses respectives. Quand Ohm explique, par une illusion auditive, que l'oreille considère les harmoniques, en totalité ou en partie, comme un renforcement du son fondamental (ou plutôt du son complexe dont la hauteur est déterminée par celle du son fondamental), il n'emploie pas là une expression tout à fait exacte, quoiqu'il soit dans le vrai, et Seebeck pouvait avec raison lui répondre que l'oreille doit être le seul juge en matière de sensations auditives, et qu'on ne peut considérer comme une illusion la manière dont elle perçoit les sons. Néanmoins les expériences que nous venons de décrire prouvent que l'oreille se comporte différemment, suivant la vivacité du souvenir de l'impression auditive isolée, fondue ultérieurement dans le tout, et suivant le degré d'attention apporté par l'expérimentateur. Nous pouvons donc en appeler, des sensations de l'oreille non prévenue, dirigeant ses activités vers le monde extérieur, et dont Seebeck défend la cause, à l'oreille s'observant elle-même avec attention, et régulièrement secondée dans ce travail, laquelle se comporte comme l'indique la loi établie par Ohm.

On peut exécuter encore une autre expérience. Si on lève les étouffoirs d'un piano, de manière à permettre à toutes les cordes de résonner librement, puis qu'on chante avec force contre la table d'harmonie de l'instrument, la voyelle A sur n'importe quelle note du piano, la résonnance des cordes donne nettement A ; de même pour l'O et l'E ; l'I moins bien. L'expérience réussit moins bien, lorsqu'on se borne à lever l'étouffoir de la corde dont on chante le son. Ce qui donne à l'écho le

même caractère que la voyelle, c'est précisément l'écho des harmoniques caractéristiques de la voyelle. Or, ceux-ci répondent mieux et plus nettement, lorsque les cordes supérieures qui leur correspondent sont libres et peuvent vibrer par influence. Ici donc, en définitive, le son de la résonnance est composé des sons de plusieurs cordes, et beaucoup de sons isolés se combinent en un seul d'un timbre particulier. Indépendamment des voyelles de la voix humaine, le piano imite aussi très-nettement le son d'une clarinette, dans les mêmes conditions.

Il faut remarquer d'ailleurs que, bien que la hauteur d'un son soit musicalement déterminée par celle du son fondamental, en réalité, les harmoniques ne sont pas sans influence. Ils donnent toujours au son quelque chose de plus éclatant, de plus élevé. Les sons simples sont sourds. Si on les compare à des sons complexes de même hauteur, on est disposé à mettre ces derniers une octave plus haut que les premiers. C'est une différence de même nature que celle qu'on observe en chantant la même note, d'abord sur l'OU, ensuite sur l'A. D'ailleurs, précisément à cause de cela, la comparaison des hauteurs de deux sons de timbres différents est souvent très-difficile; on se trompe, en effet, facilement d'une octave, et les musiciens, les acousticiens les plus distingués, sont tombés dans des erreurs de ce genre. On sait que le célèbre violoniste Tartini, à la fois théoricien éminent, a supposé tous les sons résultants une octave trop haut, tandis que, d'autre part, Henrici place les harmoniques des diapasons trop bas de la même quantité (1).

La discussion qui précède peut se résumer ainsi qu'il suit dans ses résultats :

1° Les harmoniques correspondant aux vibrations simples d'un mouvement aérien composé, existent dans la sensation, bien que n'arrivant pas toujours jusqu'à la perception consciente.

2° On peut en avoir la perception consciente, sans autre secours qu'une direction régulière imprimée à l'attention.

3° Même dans les cas où ils ne sont pas perçus isolément, et où ils se fondent dans la masse, leur existence est accusée dans la sensation par la modification du timbre ; en particulier, l'impression de la plus grande hauteur des sons partiels se traduit d'une manière caractéristique par plus d'éclat, plus d'acuïté dans le timbre.

On donnera dans le chapitre suivant des explications plus précises sur les relations des harmoniques avec le timbre.

(1) *Annales de Poggendorff*, p. 506. — La même difficulté est signalée par Zamminer comme bien connue par les musiciens (*la Musique et les Instruments*, p. 111).

CHAPITRE V

DES DIFFÉRENCES DANS LES TIMBRES MUSICAUX.

Nous avons vu, à la fin du chapitre premier, que la qualité des sons, que l'on nomme leur timbre, devait dépendre de la forme des vibrations de l'air, les raisons qui portaient à le croire étant purement négatives. On avait démontré que l'*intensité* des sons dépendait de l'amplitude des vibrations, et leur *hauteur* du nombre de ces vibrations; il ne restait donc, pour expliquer leur *timbre*, que la forme de la vibration dans les ondes sonores. Nous avons vu plus loin que, de la forme des vibrations dépendaient aussi l'existence et l'intensité des sons accessoires aigus qui accompagnent un son donné, et nous avons dû en conclure, que les sons de même timbre devaient toujours amener les mêmes combinaisons de sons partiels. Par conséquent, la forme particulière de la vibration, qui produit dans l'oreille la sensation d'un timbre déterminé, devra toujours aussi amener la sensation des sons supérieurs qui lui correspondent. Il se présente alors la question de savoir, si l'analyse des différentes espèces de timbres peut se ramener à celle des relations d'intensité qu'affectent les sons partiels, dans le phénomène de la résonnance. Nous avons vu, à la fin du chapitre précédent, que deux sons qui se produisent simultanément, par un moyen naturel ou artificiel, peuvent se fondre en un seul, dont le timbre diffère remarquablement de celui de chacun des sons composants, et qu'alors, en effet, le timbre était altéré par l'existence d'un nouveau son supérieur. Une voie s'offre ainsi à nos recherches, pour approfondir le mode d'existence, jusqu'à présent problématique, du timbre, et les causes qui le font varier.

Nous remarquons d'abord à ce sujet, que jusqu'à présent, on était généralement porté à attribuer au timbre, toutes les particularités des sons qui ne dérivaient pas directement de leur intensité et de leur hauteur. Et l'on ne s'écartait pas de la vérité, tant que l'idée de timbre ne pouvait être définie que négativement. Un peu de réflexion nous fait voir à présent, que quelques-unes de ces particularités dépendent de la façon dont les sons commencent et finissent. Ces différentes manières de commencer et de finir sont, en réalité, tellement caractéristiques, qu'il nous suffira, pour le mettre en évidence, de considérer

quelques émissions de la voix humaine. Nous choisirons pour notre objet les consonnes explosives B, D, G*u*, et P, T, K. Ces lettres sont obtenues par différentes façons d'ouvrir et de fermer la bouche. Pour B et P, la fermeture s'obtient par les lèvres ; pour D et T, par la langue et les dents de la mâchoire supérieure ; pour G et K, par le palais et la partie supérieure de la langue. Les consonnes ouvertes B, D, G, diffèrent des consonnes sourdes P, T, K, en ce que, pour les premières, la glotte se rétrécit suffisamment, pendant l'ouverture de la bouche, pour pouvoir rendre un son, ou au moins un petit bruit ou murmure, et que pour les secondes, au contraire, la glotte s'élargit et ne permet pas au son de se produire. Les premières sont donc accompagnées d'un son de voix ; il peut même se faire, si l'une de ces lettres commence la syllabe, que ce son de voix se fasse entendre un moment d'avance, et, si la lettre finit la syllabe, qu'il se prolonge un peu plus longtemps que l'ouverture de la bouche ; dans ce dernier cas, il s'introduit dans la cavité fermée de la bouche, une petite quantité d'air qui entretient, à l'entrée du gosier, le mouvement vibratoire des cordes vocales. Le rétrécissement de la glotte rend l'arrivée de l'air moins rapide et le petit bruit moins aigu et moins bref, que dans le cas des consonnes sourdes qui sont produites avec la glotte plus ouverte, et, par conséquent, avec une plus grande quantité d'air tirée de la poitrine. Mais, s'il nous est possible d'affirmer ainsi de quelle manière ces lettres se produisent, et de distinguer les diverses émissions du son de voix, nous ne sommes pas encore en état de définir au juste, quelles sont les différences correspondantes dans le mouvement de l'air.

De même que pour les lettres dont nous venons de parler, la différence des sons que rendent les cordes frappées d'une manière identique, dépend en grande partie de la rapidité avec laquelle le son s'éteint. Lorsque les cordes ont une faible masse (cordes à boyau), et sont tendues sur une table d'harmonie facilement mobile (violon, guitare, cithare), ou bien lorsque les points d'appui ou de contact sont peu élastiques (par exemple, quand les cordes de violon sont pressées sur la touche par la pointe molle des doigts), les vibrations s'éteignent très-vite après l'attaque ; le son est sec, bref, sans ampleur, comme dans le *pizzicato* du violon. Les cordes métalliques, au contraire, ayant un plus grand poids et une tension plus énergique, tendues sur de lourds et forts chevalets difficilement ébranlables, ne transmettent que lentement leurs vibrations à l'air et à la table d'harmonie ; les vibrations durent plus longtemps, le son est plus persistant et plus plein, comme dans le piano, mais il est proportionnellement moins fort et moins pénétrant, que dans les cordes qu'on fait vibrer avec une

égale force, et dont le son s'éteint très-vite : c'est ce qui fait que le pizzicato des instruments à archet, bien exécuté, impressionne beaucoup plus que le son d'un piano. Les pianos, dont les cordes exigent des supports lourds et solides, rendent, pour ce motif, un son moins pénétrant, mais bien plus durable que les instruments dont les cordes, pour la même tension, sont établies sur des supports plus légers.

D'autre part, il se présente un fait très-caractéristique dans les instruments de cuivre (trombones, trompettes), qui rendent des sons aussi stridents et aussi lourds que possible. Les différences de sons que l'on obtient avec ces instruments, ont pour cause la production de sons supérieurs différents que fait naître, dans la colonne d'air, la manière de souffler, cette colonne se partageant, à la manière des cordes, en parties vibrantes qui diffèrent de nombre et de longueur. Lorsqu'il s'agit de passer d'un état de vibration à un autre, une certaine force de souffle est nécessaire; le son est-il obtenu? il suffit d'un très-faible effort pour l'entretenir. Dans les instruments en bois, au contraire (flûtes, hautbois, clarinettes), le passage d'un son à un autre est bien plus facile; l'application des doigts aux trous et aux clefs de l'instrument, permet à la colonne d'air de changer plus rapidement de longueur, et l'intensité du souffle varie très-peu.

Ces exemples doivent suffire pour montrer, comment certaines particularités caractéristiques du son de quelques instruments, dépendent de la manière dont le son commence et finit. Lorsque nous parlerons dans la suite du *timbre musical*, nous ferons abstraction de ces particularités, relatives au commencement et à la fin du phénomène sonore, et nous ne considérerons que les sons entièrement uniformes.

Cependant, lorsqu'un son se fait entendre avec une intensité uniforme ou variable, il se trouve mélangé, dans la plupart des cas et en raison du mode de production, avec certains petits bruits accusant les irrégularités plus ou moins grandes du mouvement de l'air. Les sons qu'on obtient par un courant d'air dans les instruments à vent, sont presque toujours accompagnés, en proportion variable, des bruissements et des sifflements, que l'air produit en venant se briser sur les bords aigus de l'embouchure. Que l'on fasse vibrer, avec l'archet d'un violon, une corde, une verge ou une plaque, on entendra le grincement particulier que produit le frottement de l'archet. Les crins dont il est formé présentent un grand nombre d'inégalités, très-faibles, il est vrai; l'enduit résineux n'est jamais appliqué uniformément; la conduite de l'archet emprunte au bras qui le pousse, de petites irrégularités dans la force de la pression; toutes ces causes influent sur le mouvement vibratoire de la corde, au point que le son d'un mauvais

instrument, ou celui que rend un artiste médiocre se trouve, par suite de ces irrégularités, raboteux, rauque et inégal. Nous parlerons plus loin des mouvements de l'air qui correspondent à ces petits bruits, ainsi que des sensations de l'oreille, lorsqu'il sera question de donner une idée des battements. Habituellement, lorsqu'on écoute de la musique, on cherche à ne pas entendre ces bruits, on en fait abstraction à dessein, mais une attention plus soutenue les fait très-bien distinguer dans la plupart des sons que produisent le souffle et le frottement. On sait que la plus grande partie des consonnes est caractérisée par de petits bruits contin us de la même nature : telles sont F, V, S, Z, Th (*anglais*), J, Ch. Pour quelques consonnes, comme R et L, le son est produit par un tremblement irrégulier dans la bouche. Pour l'R, le courant d'air est interrompu périodiquement par un tremblement du palais ou de l'extrémité de la langue ; il en résulte un son intermittent, dont l'état particulier de roulement provient précisément de ces interruptions périodiques. Pour l'L, ce sont les bords latéraux de la langue, dépourvus d'élasticité et mis en mouvement par le courant d'air, qui produisent, non des interruptions complètes du son, mais des variations dans son intensité.

Les voyelles de la voix humaine ne sont pas exemptes des petits bruits dont nous parlons, quoiqu'elles appartiennent bien davantage à la catégorie musicale des sons de voix. C'est le physicien Donders qui a signalé le premier ces petits bruits ; ce sont en partie les mêmes, que ceux qu'on observe en prononçant les mêmes voyelles à voix basse, dans le chuchotement. On les rencontre au plus haut degré dans les voyelles I, U, OU, et on peut même les rendre facilement sensibles en parlant très-haut : un simple renforcement des mêmes bruits transforme la voyelle I en la consonne J allemand, la voyelle OU en W anglais. Selon moi, pour A, Ai, É, O, les bruits sont produits dans la glotte si l'on parle à voix basse, et deviennent le son de voix si l'on parle haut. Mais il est bon de remarquer que les voyelles A, Ai et É, sont moins sonores en parlant qu'en chantant, attendu que, par suite d'une plus forte pression à l'entrée du gosier, on substitue, à un son chanté ample, un son parlé plus sec qui peut s'articuler plus distinctement. Le renforcement du petit bruit paraît ici caractériser plus facilement le son propre de la voyelle. En chantant, au contraire, on cherche à favoriser la partie musicale du son, et il n'est pas étonnant qu'alors l'articulation soit moins distincte.

Quoique les petits bruits accompagnateurs, ainsi que les petites irrégularités du mouvement de l'air, caractérisent à un haut degré les sons des instruments de musique, et, suivant la disposition de la bouche, les émissions de la voix humaine, il ne nous reste pas moins

un nombre suffisant de particularités du timbre, qui tiennent à la partie musicale du son et à la période complétement régulière du mouvement vibratoire de l'air. On peut se rendre compte à quel point ces dernières ont de l'importance, si l'on écoute des instruments de musique et des voix humaines, dans un tel éloignement que les petits bruits cessent d'être sensibles. Malgré l'absence de ces bruits, on peut généralement distinguer les uns des autres les différents instruments de musique, quoique bien certainement, dans de telles circonstances, un son de cor puisse être pris pour le son de la voix humaine, un violoncelle pour un harmonium. Dans la voix humaine, les premiers sons qui se perdent par l'éloignement, sont ceux des consonnes qui sont justement caractérisées par les petits bruits, tandis que M, N et les voyelles se distinguent encore dans un éloignement considérable. Les consonnes M et N sont assimilées aux voyelles, parce que, la bouche étant complétement fermée, il ne se manifeste aucun petit bruit caractéristique, et que le son de la voix sort par le nez. La bouche joue ici le rôle d'une boîte de résonnance qui transforme le son. Il est intéressant d'écouter des voix humaines venant de la plaine, en se plaçant par un temps calme au haut d'une montagne. On ne discerne guère que les mots formés avec des M, des N et des voyelles simples, comme *mama*, *nein*, et dans ces mots, on entend très-aisément et très-nettement les voyelles qu'ils contiennent. Elles se succèdent dans un ordre bizarre, et forment des cadences qui paraissent tout à fait singulières, par la raison que sans leurs consonnes, on ne peut les arranger en mots et phrases.

Nous ferons abstraction, dans ce chapitre, de toutes les irrégularités du mouvement de l'air, ainsi que des circonstances relatives au commencement et à la fin du son, et nous n'aurons égard qu'à la partie du son véritablement musicale, celle qui correspond à un mouvement d'une durée constante et de période régulière. Nous rechercherons les rapports qui existent entre la constitution du mouvement vibratoire et le timbre du son qui en résulte, et le terme de *timbre musical* ne devra rappeler que les particularités dont nous allons nous occuper.

Le but du présent chapitre sera donc d'analyser les différents sons qui proviennent des instruments de musique, afin de mettre en évidence les différents caractères que l'on observe dans les combinaisons des harmoniques ou notes supérieures, correspondant à des variétés caractéristiques du timbre. Nous serons amenés à un certain nombre de règles générales au sujet de ces arrangements des notes supérieures, règles qui répondent dans le langage à différentes manières d'être du timbre que l'on désigne par les mots : timbre *doux*,

aigu, *éclatant*, *creux*, *plein* ou *riche*, *sourd*, *clair*, etc. Faisons abstraction, pour un instant, du but actuel de nos recherches, la détermination précise des sensations de l'oreille qui nous conduira (chapitre VI) à la distinction des timbres : nous pouvons prévoir dès à présent que les résultats de ces recherches nous seront de la plus haute importance, pour traiter la question purement musicale dont il sera parlé dans une autre partie de cet ouvrage ; ils nous apprendront en effet, à quel point les timbres musicaux dont il est bon de faire usage sont généralement riches en harmoniques, et quelles sont les particularités que l'on doit favoriser, dans les instruments de musique dont le timbre est abandonné à la volonté du facteur.

Les physiciens ayant extrêmement peu approfondi cette matière, je serai forcé d'exposer avec assez de détails le mécanisme de la plupart des instruments. Quelques-uns de mes lecteurs ne trouveront peut-être pas le sujet bien intéressant ; ils pourront de suite aller aux résultats principaux que j'ai réunis à la fin de ce chapitre. D'un autre côté, je réclamerai l'indulgence pour les lacunes que je laisse subsister dans une étude presque entièrement nouvelle, et je me bornerai aux notions essentielles, sur ceux des instruments dont la théorie acoustique est assez connue pour qu'il nous soit possible de comprendre les causes de leur sonorité. Il y a là une ample matière à d'intéressants travaux d'acoustique ; quant à moi, j'ai dû me limiter aux seules données nécessaires à la marche de mes recherches.

1. Des sons simples.

Nous commencerons notre étude par les sons qui ne sont pas accompagnés de notes supérieures, c'est-à-dire par les sons *simples*. On peut aisément produire des sons de cette espèce parfaitement purs, en faisant vibrer un diapason à l'orifice d'un tuyau sonore, de la manière que nous avons décrite au chapitre précédent. Les sons ainsi obtenus sont en général doux, ne présentent ni mordant ni dureté ; ainsi que nous l'avons dit précédemment, ils paraissent plus bas qu'ils ne sont en réalité, au point que ceux d'entre eux qui égalent en hauteur les sons graves d'une voix de basse-taille, produisent une impression grave toute particulière et insolite : leur timbre a quelque chose de sombre. Les sons simples, compris dans le registre du soprano, sont clairs ; les plus élevés mêmes sont très-doux, sans aucune trace de cette acuïté stridente dont sont affectés les sons aigus de la plupart des instruments : les sons de flûte seuls ont quelque chose d'analogue, parce qu'ils ont des harmoniques peu nombreux et faiblement perceptibles, ce qui les rapproche des sons simples. Parmi les sons de la

voix humaine, la voyelle OU se rapproche des sons simples, quoiqu'elle ne soit pas entièrement exempte de sons partiels. En comparant le timbre d'un son simple avec celui d'un son composé accompagné d'harmoniques peu élevés, on observe que le dernier, à côté du son simple, a quelque chose de plus éclatant, de plus métallique, de plus sonore. La voyelle OU elle-même, quoique la plus sourde et la plus pauvre en sonorité de toutes les voyelles, est remarquablement plus éclatante et moins sourde qu'un son simple de même hauteur. C'est que, si nous considérons la série des six premiers sons partiels d'un son composé, nous pouvons très-bien admettre, au point de vue musical, que ce dernier représente une sorte d'accord majeur avec un son fondamental prépondérant. Et en réalité un son de cette nature, une belle note de la voix, par exemple, possède, contrairement au son simple, un timbre où l'on distingue quelque chose de l'effet agréable d'un accord harmonieux.

Puisque la forme d'une onde sonore simple est complétement déterminée, lorsqu'on connaît l'amplitude de la vibration, les sons simples peuvent différer d'intensité, mais non de timbre. Par le fait, le caractère de ces sons est toujours le même ; seulement il faut avoir le soin de transmettre à l'air environnant le son fondamental d'un diapason, comme nous l'avons expliqué précédemment, au moyen d'un tuyau sonore d'une substance convenable, telle que du verre, du métal ou du carton, ou bien encore par le moyen d'une corde ; il faut, en outre, que rien dans l'appareil ne puisse donner lieu à des crépitations résultant de chocs.

Des sons simples, et qui sont seulement accompagnés de bruissements de l'air, peuvent être obtenus, ainsi que nous l'avons dit, quand on souffle dans la concavité d'une bouteille. Dès qu'on parvient à éliminer les petits bruits accessoires, le timbre musical de ces sons redevient identique à celui du diapason.

2. Sons accompagnés de sons partiels non harmoniques.

A côté des sons entièrement dépourvus de sons partiels, il faut placer, en première ligne, ceux qui sont accompagnés de sons partiels non harmoniques avec le son principal, et qui, pour ce motif, ne peuvent pas, à proprement parler, être rangés au nombre des sons musicaux, suivant la définition que nous avons adoptée. On ne les emploie qu'exceptionnellement en musique, et seulement dans le cas où l'intensité du son fondamental l'emporte tellement sur celle de ses notes supérieures, que ces dernières peuvent être comptées pour rien. Je les place donc immédiatement après les sons simples, attendu qu'au point de vue musical, ils ne représentent après tout que des sons

simples plus ou moins purs. Nous rencontrons en premier lieu, ceux qu'on obtient avec les *diapasons*, lorsqu'après les avoir ébranlés, on les place sur une table de résonnance, ou très-près de l'oreille. Les sons partiels des diapasons sont très-élevés ; dans les diapasons dont j'ai fait usage, le premier correspondait à des nombres de vibrations de 5 fois $\frac{8}{10}$ à 6 fois $\frac{6}{10}$ plus grands, que celui des vibrations du son principal : il se trouvait situé, par conséquent, entre la troisième quinte diminuée, et la troisième sixte majeure de la note fondamentale. Les nombres de vibrations de ces sons élevés sont entre eux comme les carrés des nombres impairs : si le premier donne $3 \times 3 = 9$ vibrations, les suivants en produisent $5 \times 5 = 25, 7 \times 7 = 49$, etc. Leur hauteur croît alors extraordinairement vite ; en règle générale, ces notes ne sont pas harmoniques avec le son principal, mais il peut s'en rencontrer qui le soient par exception. Si nous appelons ut_1 la note principal d'un diapason, les suivantes seront à peu près $la\sharp_2$, $ré_5$, $ut\sharp_6$. Ces notes supérieures forment un tintement très-distinct, non harmonique avec le son générateur, et que l'on entend facilement si l'on attaque le diapason à une certaine distance ; si au contraire, on porte le diapason tout près de l'oreille, on n'entend plus que le son générateur. L'oreille sépare aisément le son principal de ses notes supérieures, et n'a aucune tendance à les confondre ; les notes élevées s'éteignant généralement vite, tandis que le son principal a une durée assez prolongée. D'ailleurs, il est à remarquer, que la série supérieure des sons du diapason varie un peu avec la forme de l'instrument, et que, par suite, les indications qu'on retire de ces expériences ne peuvent être qu'approximatives. Dans la détermination théorique des sons partiels, on pourra considérer chaque branche du diapason comme une tige fixée par une de ses extrémités.

Les *tiges* droites élastiques donnent également, ainsi que nous l'avons dit ailleurs, des notes supérieures non harmoniques et passablement élevées. Si l'on fixe ces tiges suivant deux lignes nodales de leur son principal, la résonnance de ce dernier se trouve favorisée bien plus que celle des notes supérieures, lesquelles, se perdant assez vite, ne troublent point trop la sensation. Malgré cela, de pareilles tiges demeurent peu applicables à la musique véritablement artistique, quoique de nos jours, et à cause de leur son pénétrant, on les ait introduites dans la musique militaire, et dans les orchestres de danse. Autrefois on employait des tiges de verre et de bois dans certains instruments, tels que l'*harmonica*, le *claquebois* et l'*instrument de paille*. Les tiges se trouvaient serrées entre deux cordons tressés ensemble, de telle sorte qu'elles étaient fixées suivant leurs lignes no-

dales. On laissait tout simplement les tiges du claquebois reposer sur des cylindres de paille. On jouait de ces instruments avec des marteaux de bois ou de liége.

La matière des tiges n'influe sur le timbre que par le degré de persistance qu'elle prête aux sons supérieurs. Ordinairement, avec un métal élastique et parfaitement homogène, les sons, et surtout ceux du haut, durent plus longtemps qu'avec toute autre substance ; cela tient à ce qu'en raison de sa masse considérable, le métal tend à conserver plus longtemps le mouvement une fois commencé. Les métaux qui présentent la plus parfaite élasticité sont l'acier et les alliages du cuivre avec le zinc ou l'étain. Dans les métaux précieux, faiblement alliés, la persistance du son est encore plus grande, quoique l'élasticité soit ici moindre : cela tient à la densité considérable de ces métaux. L'élasticité, à un degré plus parfait, semble favoriser particulièrement la persistance des sons plus élevés, car les vibrations s'éteignent en général d'autant plus vite qu'elles sont plus rapides, pour une substance imparfaitement élastique. Ce qui caractérise, en général, la qualité spéciale qu'on a l'habitude d'appeler timbre métallique, consiste donc, à mon avis, dans le degré de persistance et de régularité qui distingue les sons partiels relativement élevés. Le timbre du verre jouit de propriétés analogues, mais comme on ne peut demander à cette matière que des ébranlements peu considérables, le son en est toujours faible et doux ; il est assez élevé et se perd très-vite, en raison de la faible masse du corps vibrant. Pour le bois dont la densité est faible, dont la structure intérieure est assez grossière, qui est rempli d'innombrables petites cavités, et qui possède une élasticité imparfaite, les sons s'éteignent rapidement, surtout les sons élevés. C'est pourquoi le claquebois satisfait peut-être plus une oreille musicale que les harmonicas formés par des tiges de verre ou d'acier, et dont les notes supérieures, non harmoniques, sont passablement aiguës. Nous parlerons d'ailleurs plus loin, de l'emploi restreint qu'on peut faire en musique des sons simples de cette nature.

On attaque tous ces instruments avec des marteaux de bois ou de liége, que l'on recouvre de peau afin d'affaiblir les notes supérieures les plus hautes. Ce résultat ne serait pas obtenu avec des marteaux métalliques rigides, qui amèneraient de grandes discontinuités au début du mouvement vibratoire des tiges. Je parlerai bientôt d'une influence de la même nature qui se manifeste dans la manière d'attaquer les cordes vibrantes.

Des *plaques parfaitement élastiques*, auxquelles on donne les formes circulaire, ovale, carrée, rectangulaire, triangulaire ou hexagonale, possèdent, suivant la découverte de *Chladni*, la propriété de

résonner en affectant un grand nombre de formes différentes de vibration, et par suite de fournir des sons qui, généralement, ne sont pas harmoniques les uns avec les autres. Dans la figure 21 sont représen-



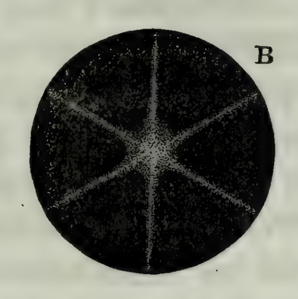




Fig. 21.

tées les formes les plus simples de vibration d'une plaque circulaire ; il se produit des formes autrement compliquées, lorsqu'il existe un plus grand nombre de cercles ou de diamètres qui jouent le rôle de lignes nodales, ou lorsque les cercles et les diamètres se combinent entre eux. Si la forme de vibration A donne l'ut_1, les autres formes donnent les notes du tableau suivant :

NOMBRE des CERCLES NODAUX.	NOMBRES DES DIAMÈTRES.					
	0	1	2	3	4	5
0			ut_1	$ré_2$	ut_3	sol_3—$sol\sharp_3$
1	$sol\sharp_1$	$si\flat_2$	sol_3			
2	$sol\sharp_3$ +					

On voit par ce tableau combien une plaque circulaire peut donner de sons relativement voisins les uns des autres. Toutes les fois qu'on ébranle la plaque, on entend résonner celles de ces notes qui n'ont pas de point nodal aux endroits attaqués. On peut néanmoins favoriser la résonnance de sons isolés déterminés, en fixant des points de la plaque, qui appartiennent aux lignes nodales des notes que l'on désire obtenir ; dans ce cas, toutes les notes qui ne fournissent pas de lignes nodales aux points directement ébranlés s'éteignent rapidement. Si l'on soutient, par exemple, une plaque circulaire en trois points d'un cercle nodal (*fig.* 21, C), et que l'on choisisse le centre pour foyer d'ébranlement, on obtiendra le son qui correspond dans notre tableau à la forme de vibration désignée par sol_1, et l'on ne percevra que très-faiblement toutes les autres notes ut_1, $ré_2$, ut_3, sol_3, $si \flat_2$, dont les lignes nodales sont des diamètres du cercle, qui passent par le point directement ébranlé, c'est-à-dire par le centre.

La note sol_3, qui répond à deux circonférences nodales, cesse également de se faire entendre, parce que les points d'appui se trouvent dans ses ventres de vibration, tandis que l'on peut entendre résonner plus fortement la note qui correspond à trois circonférences, l'une de ces lignes nodales coïncidant presque avec celle du numéro 2. Cette note, qui est déterminée par trois cercles nodaux, est plus élevée de trois octaves et un peu plus d'un ton entier que le son du numéro 2, et par suite ne trouble pas beaucoup ce dernier à cause du grand intervalle qui l'en sépare. C'est pourquoi le son obtenu par le procédé que nous venons de décrire est passablement musical, tandis qu'en général le son des plaques, mêlé d'un grand nombre de notes non harmoniques et très-voisines, est creux, pareil à celui d'un chaudron et inapplicable à la musique. Cependant, par suite du choix des points d'appui, le son dont nous parlons s'éteint habituellement assez vite, au moins dans les plaques de verre, attendu que le contact de plusieurs points, même de points nodaux, nuit toujours considérablement à la liberté des vibrations.

Le son des cloches est également mélangé de notes non harmoniques, mais qui ne se trouvent pas aussi voisines les unes des autres que dans le cas précédent. Les différentes sortes de vibrations qui se produisent habituellement, correspondent à des lignes nodales qui sont toujours en nombre pair, quatre, six, huit, dix, etc., et qui décomposent la cloche en segments équivalents, par des lignes qui descendent du sommet vers les bords. Dans les cloches de verre qui ont à peu près partout la même épaisseur, les notes qui se rapportent aux nombres précédents, sont sensiblement proportionnelles aux carrés des nombres deux, trois, quatre, cinq, etc. Si nous appelons *ut*, le son le plus grave, nous pourrons former le tableau suivant :

Nombre de lignes nodales.	4	6	8	10	12
Notes..................	ut_1	$ré_2$	ut_3	$sol\sharp_3$ —	$ré_4$ —

Toutefois les notes changent quand la paroi est trop mince ou trop épaisse vers les bords; il paraît même que l'on peut rendre harmoniques les premiers sons graves, en donnant à la clocle une forme particulière, déterminée empiriquement, et c'est un point capital dans l'art de fondre les cloches (1). Il en résulterait qu'il serait peut-être

(1) D'après les observations de M. Gleitz, organiste, la grosse cloche du dôme d'Er-

possible de faire naître d'autres formes de vibration que les précédentes, et d'avoir des circonférences nodales parallèles au bord ; mais il paraît qu'il n'est pas facile d'y arriver, et on ne les a pas encore étudiées.

Lorsqu'une cloche n'est pas tout à fait symétrique par rapport à son axe, par exemple si l'épaisseur n'est pas entièrement la même en deux endroits de son pourtour, elle fait entendre en général deux sons qui diffèrent un peu l'un de l'autre et qui donnent lieu à des battements. Il existe sur le bord quatre positions d'ébranlements, situées à angle droit, pour lesquelles on entend un seul des deux sons, sans battement ; il en existe quatre autres, entre les premières, pour lesquelles le deuxième son se fait entendre seul ; mais si l'on vient à frapper la cloche en un autre point quelconque, différent de ces huit positions, on entend les deux sons avec les battements qui se manifestent dans la plupart des cloches, lorsque le son s'éteint paisiblement.

Les *membranes* tendues sont aussi accompagnées de notes non harmoniques, assez voisines les unes des autres. Pour une membrane circulaire, si l'on désigne par *ut* le son le plus grave, les autres notes seront, par ordre de hauteur, les suivantes :

NOMBRE DES LIGNES NODALES.		NOTES.
DIAMÈTRES.	CIRCONFÉRENCES.	
0	0	ut_0
1	0	$la\flat_1$
2	0	$ut\sharp_2 + 0,1$
0	1	$ré_2 + 0,2$
1	1	$sol_3 + 0,2$
0	2	$si\flat_3 + 0,1$

Ces notes s'éteignent très-rapidement. Si l'on fixe la membrane sur une caisse remplie d'air comme dans les tambours et les timbales, les relations des notes peuvent être changées, et la note fondamentale seule paraît être renforcée au détriment des autres. Les notes secondaires qui accompagnent le son du tambour, n'ont pas encore été étudiées davantage. Cet instrument ne sert dans la musique que pour accentuer certains passages, et, si on l'accorde, ce n'est pas afin de compléter les accords par sa note particulière, mais pour ne pas troubler l'harmonie de l'ensemble.

furth, fondue en 1477, donne, en réalité, les notes suivantes : *mi*, mi_1, $sol\sharp_1$, si_1, mi_2, $sol\sharp_2$, si_2, $ut\sharp_2$. Ce dernier son seul ne rentre pas dans l'accord parfait majeur.

Les divers instruments dont nous avons parlé jusqu'ici ont cela de commun, que leur mouvement vibratoire fait naître des notes supérieures non harmoniques, et que la proximité de ces notes et du son principal a pour résultat de produire un son qui est, au plus haut degré, impropre à la musique et désagréable à l'oreille. Si les notes supérieures sont faibles et situées très-loin de la note principale, on peut admettre que le son est musical (diapasons, harmonicas, cloches); on l'emploie dans les marches et autres morceaux bruyants, où l'on tient d'ordinaire à faire ressortir le rhythme; mais, comme nous l'avons déjà fait remarquer, on dédaigne ces instruments dans la musique vraiment artistique, et l'on a parfaitement raison. Car les notes supérieures non harmoniques, malgré la brièveté de leur durée, n'en troublent pas moins l'harmonie d'une façon très-désagréable, parce qu'elles se répètent à chaque coup frappé sur l'instrument. J'en citerai un exemple frappant : une troupe de musiciens sonneurs de cloches (soi-disant écossais) parcourait dernièrement le pays, et exécutait toutes sortes de morceaux d'une façon assez artistique. La précision et l'habileté dans l'exécution étaient remarquables, mais, par suite d'une quantité considérable de sons partiels, l'effet musical était horrible ; et cependant on prenait la précaution, dès qu'une note avait accompli sa durée, d'étouffer le son de la cloche en posant celle-ci sur une table recouverte d'un drap épais.

On peut faire résonner les différents corps dont nous venons de nous occuper, en les ébranlant avec l'archet du violon ; on obtient encore ainsi des sons non harmoniques, mais, en étouffant convenablement les lignes nodales du son que l'on veut obtenir, on élimine les notes supérieures les plus proches. On entend alors un son plus intense que les autres qui l'accompagnent, et dont on pourrait faire usage en musique, si l'archet, en frottant sur tous ces corps (diapasons, plaques, cloches), ne produisait pas un raclement très-prononcé ; au moyen des résonnateurs, on peut s'assurer que ce raclement est dû principalement aux sons partiels faux, se succédant par petites secousses irrégulières dans l'oreille. Or, nous avons déjà fait remarquer, que des sons intermittents avaient pour résultat d'amener l'impression d'un raclement ou d'un grincement. Au contraire, si le corps ébranlé par l'archet ne se trouve aussi accompagné que de notes supérieures harmoniques, il peut très-bien adapter son mouvement vibratoire à chaque secousse que l'archet lui imprime, et rendre un son véritablement musical. La raison en est que chaque mouvement périodique, que l'archet tend à lui communiquer, peut parfaitement concorder avec les mouvements vibratoires qui produisent les notes harmoniques, mais non avec ceux qui correspondent aux autres sons non harmoniques.

3. Sons des cordes.

Nous allons maintenant analyser les sons véritablement musicaux, qui sont caractérisés par des notes supérieures harmoniques. Afin de rendre cette étude plus facile, nous classerons les différents modes de formation des sons, et nous distinguerons si les sons ont été produits :

1° Par la percussion ou le pincement;
2° Avec l'archet;
3° En soufflant contre un biseau;
4° En soufflant contre des languettes élastiques.

Les deux premières catégories comprennent seulement les instruments à cordes, attendu que les cordes sont les seuls corps solides élastiques qui puissent donner des harmoniques très-purs, les verges que l'on fait vibrer longitudinalement n'étant pas usitées en musique. La troisième catégorie comprend les flûtes et les jeux de flûte des orgues; dans la quatrième, se placent les autres instruments à vent et la voix humaine.

Cordes ébranlées par une attaque brusque. — Les instruments qui se rapportent à un pareil mode d'ébranlement sont, pour la musique, le *piano*, la *harpe*, la *guitare* et la *cithare*, et, pour la physique, le *monocorde*, employé pour la recherche exacte des lois qui régissent les vibrations des cordes : le *pizzicato* des instruments à archet rentre également dans le cas qui nous occupe. Nous avons déjà dit, dans le courant de cet ouvrage, que les cordes, frappées ou pincées, donnaient un grand nombre de notes supérieures.

Pour les cordes pincées, il existe une théorie complète de leur mouvement, de laquelle résultent immédiatement les hauteurs relatives des différents harmoniques. Déjà, dans le chapitre qui précède, nous avons comparé une partie des conséquences de cette théorie avec les résultats de la pratique, et nous avons rencontré une parfaite concorcordance. Il existe également une théorie complète, pour le cas où une corde est frappée en un de ses points par un corps dur et aigu. Le problème se complique lorsqu'on frappe la corde avec des marteaux mous et élastiques, comme ceux des pianos ; cependant, on peut encore, dans ce cas, établir sur le mouvement des cordes une théorie qui comprend au moins les traits essentiels du phénomène, et qui rend compte de l'intensité relative des harmoniques (1).

Cette intensité dépend en général :

1° Du *mode d'attaque* de la corde;

(1) Voir le supplément IV à la fin de l'ouvrage.

2° De l'*endroit* où on l'attaque;

3° Du *diamètre*, de la *rigidité* et de l'*élasticité* de la corde.

Quant au mode d'attaque, il peut se faire, en premier lieu, en écartant la corde de sa position d'équilibre, soit avec le doigt, soit à l'aide d'une pointe (plectrum, anneau du joueur de cithare), et l'abandonnant à elle-même. Cette manière de produire le son est employée dans un grand nombre d'instruments à cordes anciens et modernes; parmi ceux qu'on a conservés de nos jours, nous pouvons citer la *harpe*, la *guitare* et la *cithare*. En second lieu, on peut frapper la corde avec une sorte de marteau, comme dans le *piano* et les variétés plus anciennes de cet instrument (*épinette*).

J'ai déjà fait observer précédemment, que l'intensité et le nombre des harmoniques supérieurs sont d'autant plus considérables, que le mouvement vibratoire présente des discontinuités plus nombreuses et plus prononcées : c'est là ce qui caractérise les différents modes principaux d'ébranlement d'une corde. Lorsque la corde est pincée, le doigt l'écarte de sa position d'équilibre d'un bout à l'autre de sa longueur, avant de l'abandonner à elle-même. Il se produit une discontinuité, rien que dans l'ouverture plus ou moins grande de l'angle qu'elle présente, à l'endroit où elle est pincée par le doigt ou la pointe qui la met en vibration. Cet angle est plus aigu lorsqu'on fait usage d'une pointe que lorsqu'on se sert du doigt; dans le premier cas, on obtient un son plus perçant, accompagné d'un plus grand nombre de notes supérieures élevées qui produisent une sorte de tintement. Mais, dans l'un et l'autre cas, l'intensité du son principal est toujours plus grande que celle des sons supérieurs. Si la corde est frappée par un marteau métallique en forme de coin, qui puisse se relever aussitôt après le coup, le mouvement direct n'est transmis qu'au point particulier où a eu lieu l'excitation vibratoire. Le reste de la corde est encore en repos immédiatement après l'attaque, et ne se met en mouvement, qu'au passage de l'ondulation curviligne qui prend naissance au point frappé, et qui se propage de part et d'autre de la corde. En restreignant ainsi le mouvement originaire à un seul point de la corde, on fait naître des discontinuités très-prononcées, auxquelles correspond une longue série d'harmoniques dont l'intensité (1), pour une grande partie d'entre eux, est équivalente ou même supérieure à celle du son fondamental. Quand le marteau est mou et élastique, le mouvement a le temps de se propager sur la corde avant que le marteau revienne en arrière; la partie attaquée n'est pas mise en mouve-

(1) Le mot *intensité* employé dans ce passage et les suivants est pris dans le sens d'une mesure objective, au moyen de la *force vive* ou du *travail mécanique* du mouvement correspondant.

ment par un choc brusque, et, par conséquent, sa vitesse s'accroît continuellement tant que dure le contact du marteau. C'est pourquoi la discontinuité du mouvement est d'autant plus atténuée, et l'intensité des harmonique élevés d'autant moindre, que le marteau est moins dur.

On peut se convaincre de l'exactitude de ce qui précède à l'aide d'un piano ouvert. Si l'on abaisse une touche en mettant dessus un poids suffisant, la corde correspondante se trouve dégagée de son étouffoir, et l'on peut alors, à volonté, la pincer avec le doigt ou avec une pointe, ou bien la frapper avec une pointe métallique ou avec un marteau de piano. On obtient par ces divers moyens des sonorités tout à fait différentes. Que l'on pince ou que l'on frappe la corde avec un objet métallique et dur, le son qui en résulte est aigu et tintant, et, à l'aide d'une certaine attention, on entend distinctement un grand nombre de notes très-élevées. Ces notes cessent, le son devient moins éclatant, plus doux et plus sonore, si l'on pince la corde avec l'extrémité molle du doigt, ou bien si on la frappe avec un marteau de l'instrument. On distingue encore très-facilement les variations correspondantes de l'intensité du son fondamental. Si l'on se sert d'un métal pour frapper, ce son principal s'entend à peine, et le son total est *vide*, en quelque sorte. Cette particularité du son, que nous désignons par le mot *vide*, se manifeste toutes les fois que les notes supérieures ont trop de force, relativement au son fondamental. Ce dernier est le plus *plein* possible lorsque la corde est pincée par le doigt, auquel cas le son total est doué d'une sonorité pleine et harmonieuse. L'action du marteau ne donne pas, du moins dans le médium et la partie grave, un son aussi plein que lorsqu'on pince la corde avec le gras du doigt.

C'est ici le lieu de se demander, pour quelle raison il est avantageux de recouvrir les marteaux de couches épaisses de feutre fortement comprimées, et, par suite, rendues élastiques. Les couches de l'extérieur sont ordinairement les plus souples, celles de l'intérieur les plus rigides. Aussi la surface du marteau touche-t-elle la corde sans choc trop brusque, tandis que les couches intérieures développent la force élastique en vertu de laquelle le marteau est renvoyé par la corde. Un renvoi de la même nature se manifeste si l'on prend un marteau de piano, et qu'on le frappe avec force sur une table ou contre un mur : il rebondit sur ces surfaces rigides à la façon d'une balle de caoutchouc. Plus le marteau est lourd, plus les couches de feutre sont épaisses, ce qui est précisément le cas des marteaux de la partie grave, et plus le renvoi du marteau par la corde se fait attendre. Pour les octaves élevées, on a l'habitude d'alléger les marteaux et de diminuer l'épaisseur du feutre.

C'est évidemment la pratique qui a fait découvrir aux facteurs d'instruments les proportions à observer entre l'élasticité du marteau et le son de la corde. La constitution du marteau exerce sur le timbre une influence extrême. La théorie démontre que les notes supérieures, dont la demi-vibration dure un temps égal à celui pendant lequel le marteau repose sur la corde, sont ordinairement rendues plus sensibles par la percussion, tandis que les notes, pour lesquelles le rapport de ces durées est de 3, 5, 7,... fois plus considérable, se trouvent proportionnellement affaiblies.

J'ai fait usage, dans mes recherches, d'un excellent piano à queue entièrement neuf, de Kaim et Günther. Dans cet instrument, l'harmonique, qui s'affaiblit ou s'annule le premier, paraît être, en général, le septième, souvent même, le sixième ou le cinquième, dans les octaves du médium et de la partie grave; il se présente souvent des différences d'une touche à sa voisine. Il en résulte, que le temps pendant lequel le marteau repose sur la corde, correspond à peu près à celui d'une demi-vibration du premier harmonique. Pour les octaves élevées, au contraire, cet intervalle de temps semble atteindre ou même dépasser la durée d'une demi-vibration du son fondamental. Nous dirons plus loin comment, connaissant ces faits, on calcule l'intensité de chacun des harmoniques.

La deuxième circonstance qui influe sur la constitution du son, c'est la position du point d'attaque. Nous avons déjà remarqué (chap. IV), en examinant la loi de Ohm sur l'analyse des sons par l'oreille, que le son d'une corde pincée ou frappée est dépourvu des harmoniques qui ont un nœud au point d'attaque; les harmoniques, au contraire, qui ont un ventre au même point, sont renforcés le plus possible. En général, si l'on frappe la corde en des points différents de sa longueur, l'intensité des harmoniques croît ou s'affaiblit, proportionnellement au degré d'amplitude de la vibration simple de la corde au point attaqué. Dès lors, la composition du son des cordes peut être modifiée de différentes manières si, toutes choses égales d'ailleurs, on ne fait varier que le point d'attaque.

En frappant une corde, juste en son milieu, par exemple, on fait disparaître le deuxième son (premier harmonique), dont le nœud se rencontre au même point. Le troisième son, au contraire, dont les nœuds tombent au tiers et aux 2/3 de la corde, se fait entendre avec plus de force, puisque le point d'attaque se trouve au milieu de l'intervalle de ces deux points. Le quatrième son a ses nœuds au quart, à la moitié et aux 3/4 de la corde : il disparaît, puisque le point attaqué coïncide avec son deuxième nœud. Les sixième, huitième, et plus généralement tous les sons pairs, cessent de se faire entendre, tandis que les sons

impairs sont renforcés. L'absence des sons pairs donne à une corde, frappée ainsi par le milieu, un timbre particulier qui diffère essentiellement du timbre habituel des cordes : le son est en quelque sorte creux et nasillard. L'expérience est facile à faire sur un piano ouvert dont on a soulevé les étouffoirs. On trouve assez vite le milieu exact de la corde en cherchant avec le doigt le point à partir duquel le deuxième harmonique est obtenu pur et sonore.

Si l'on frappe une corde au tiers de sa longueur, on élimine les sons 3, 6, 9, etc. Le son de la corde a quelque chose de creux, quoique à un degré moins prononcé que dans le cas précédent. Si l'on éloigne le point d'attaque de la corde jusque dans le voisinage d'une de ses extrémités, on favorise des harmoniques très-élevés aux dépens d'harmoniques plus graves et du son fondamental : le son de la corde est vide et tintant.

Dans le piano, le marteau frappe les cordes du médium en des points situés à 1/7 et jusqu'à 1/9 de leur longueur ; nous devons supposer que ces points ont été choisis principalement parce que, d'après l'expérience, ils correspondent aux sons musicaux les plus agréables et les plus appropriés aux combinaisons harmoniques. Ce résultat n'a été fondé sur aucune théorie, mais il a été amené par suite d'une éducation plus perfectionnée de l'oreille et d'une expérience pratique de deux siècles. Aussi la recherche de la composition du son, suivant la position du point frappé, présente-t-elle ici un intérêt particulier. L'avantage essentiel qui paraît avoir déterminé le choix de ce point dans le piano, consiste dans l'élimination, ou du moins, dans l'affaiblissement considérable du septième et du neuvième son partiel. Ces notes sont, dans le cortége harmonique, les premières qui n'appartiennent pas à l'accord parfait majeur du son principal. Les premiers intervalles sont l'octave, la quinte et la tierce majeure ; le septième son donne à très-peu près une septième mineure, le neuvième une seconde majeure. Ces deux derniers intervalles ne se trouvent donc pas compris dans l'accord parfait majeur. On peut aisément se convaincre, en effet, à l'aide d'un piano, que s'il est facile de bien percevoir les six premiers sons partiels, au moins dans les cordes graves et moyennes que l'on touche aux points nodaux convenables, on ne parvient pas à obtenir les sons 7, 8 et 9 ; tout au plus les entend-on faiblement et d'une manière imparfaite. La difficulté ne provient pas ici de l'inaptitude de la corde à se subdiviser en parties vibrantes aussi petites, car si, au lieu de la frapper en abaissant la touche, on la pince avec le doigt plus près de son extrémité qu'on ne l'a indiqué plus haut, on entend très-distinctement les sons partiels 7, 8, 9, et même 10 et 11, en rendant immobiles les nœuds qui leur correspondent. Ce n'est que

dans les octaves plus élevées, que les cordes deviennent trop courtes et trop rigides, pour pouvoir donner des harmoniques d'une certaine hauteur. Quelques facteurs font frapper les cordes de cette région dans le voisinage de leur extrémité, afin d'obtenir un son plus clair et plus pénétrant. Les notes supérieures qui, dans ce cas, sont déjà difficiles à produire, par suite de la rigidité de la corde, se trouvent ici favorisées aux dépens du son fondamental. On obtient pareillement un son plus clair, mais aussi plus grêle et plus vide, en installant un petit chevalet tout près et en arrière du point d'attaque d'une corde grave, de telle sorte que le marteau frappe en un point qui soit à une distance de l'extrémité de la corde un peu moindre que 1/7 de sa longueur.

Si l'on peut rendre le son plus tintant et plus perçant, en frappant la corde avec un corps dur, on peut aussi le rendre plus sourd, c'est-à-dire donner au son principal la prédominance sur ses harmoniques, en employant un marteau plus mou et d'un plus grand poids, par exemple un petit marteau en bois recouvert de caoutchouc. Ce sont principalement les cordes graves qui rendent un son plein, mais sourd. Afin de pouvoir comparer ici les différents sons que rendent les cordes, suivant les marteaux mis en usage, on doit toujours s'attacher à frapper la corde à la même distance de l'une de ses extrémités, comme dans le piano, sans quoi les variations de sonorité, qui dépendent de la position du point d'attaque, interviendraient pour troubler la sensation. Toutes ces circonstances sont naturellement connues des facteurs d'instruments, qui ont adopté, dans une certaine mesure, des marteaux plus pesants et plus mous pour les octaves graves que pour les octaves élevées. S'ils n'ont pas dépassé une certaine masse pour leurs marteaux, et, si ces derniers n'ont pas été modifiés davantage en vue de limiter l'intensité des harmoniques, c'est qu'une oreille musicale éprouve de la préférence pour les harmoniques élevés d'une certaine intensité, lorsqu'il s'agit d'un instrument qui est destiné à faire entendre de riches combinaisons d'harmonie. Sous ce rapport, la composition du son dans les cordes de piano présente un grand intérêt pour la théorie de la musique. Aucun autre instrument n'offre à un tel degré une pareille variabilité du timbre ; dans aucun autre, par conséquent, une oreille musicale n'est aussi libre de choisir les timbres qui lui conviennent.

J'ai déjà fait remarquer précédemment que, par l'action des touches, on peut, en général, très-bien discerner, dans les cordes graves et moyennes du piano, les six premiers sons partiels ; que les trois premiers se manifestent avec une certaine intensité, et que le cinquième et le sixième, quoique très-distincts, sont beaucoup plus faibles. Les

septième, huitième et neuvième manquent par suite de la position du point d'attaque ; ceux d'un ordre plus élevé sont toujours très-peu sensibles. On pourra établir une comparaison plus intime à l'aide du tableau suivant, où les intensités des sons partiels d'une corde, frappée de différentes manières, ont été calculées théoriquement, d'après la formule développée à la fin de l'ouvrage. L'effet produit par l'ébranlement du marteau dépend du temps pendant lequel il repose sur la corde. Ce temps est évalué dans le tableau en fractions de la durée d'une vibration du son fondamental. On a donné en outre les résultats du calcul pour une corde pincée par le doigt. Le point d'attaque est, dans tous les cas, situé au 1/7 de la longueur de la corde.

Nos D'ORDRE DES SONS PARTIELS.	INTENSITÉS THÉORIQUES DES SONS PARTIELS					
	EN PINÇANT LA CORDE.	AVEC UN MARTEAU DONT LA DURÉE DE CONTACT EST :				AVEC UN MARTEAU TRÈS-DUR.
		3/7	3/10	3/14	3/0	
		de la durée de la vibration du son principal				
		ut_3	sol_2	ut_{-1}—ut_2		
1	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	81,2	99,7	189,4	249,0	285,7	324,7
3	56,1	8,9	107,9	242,9	357,0	504,9
4	31,6	2,3	17,3	118,9	259,8	504,9
5	13,0	1,2	0,0	26,1	108,4	324,7
6	2,8	0,01	0,5	1,3	18,8	100,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Afin de pouvoir mieux comparer les résultats, l'intensité de la note principale a été prise égale à 100. J'ai comparé les intensités calculées avec les intensités effectives dans le cas du piano dont j'ai déjà parlé : la première série de nombres inscrits au-dessous de la fraction 3/7 s'est trouvé correspondre à très-peu près à la région de l'ut_3. Dans les notes plus élevées, on trouve des harmoniques bien plus faibles que ceux de la colonne en question. En faisant résonner l'ut_3 du piano, le deuxième son était très-fort, le troisième presque nul. La deuxième colonne, celle qui est précédée de la fraction 3/10, correspondait à peu près au sol_2 ; les deux premiers harmoniques sont très-forts, le troisième faible. La troisième colonne correspond aux cordes graves, depuis l'ut_2 en descendant jusqu'aux sons les plus graves : les trois

premiers harmoniques sont très-intenses, et le quatrième assez faible. Dans la colonne suivante, le troisième son est plus fort que le deuxième, résultat qui ne concorde plus avec l'indication de mon piano. Enfin, dans le cas d'un marteau très-dur, les troisième et quatrième sons partiels ont la même force, et l'emportent sur tous les autres. Il résulte des nombres du tableau, que le son fondamental d'une corde moyenne ou grave du piano est plus faible que le premier, ou même que les deux premiers harmoniques, résultat confirmé par la comparaison entre les cordes frappées et les cordes pincées. Dans ce dernier cas, le premier harmonique est un peu plus faible que le son fondamental, mais ce dernier est beaucoup plus net si l'on pince la corde avec le doigt, que si l'on agit sur la touche pour le faire résonner.

Quoiqu'il soit possible de produire un son où la note principale soit prédominante, ainsi qu'on le voit dans les octaves élevées du piano, on n'en a pas moins préféré, pour les octaves graves, la combinaison qui rend les harmoniques très-distincts jusqu'aux troisième et quatrième, et qui permet aux premier et deuxième de l'emporter sur le son fondamental.

En dernier lieu, le *diamètre* et la *matière* des cordes exercent aussi, comme il a été dit plus haut, leur influence sur le timbre. Les cordes très-rigides ne donnent pas des harmoniques très-élevés, attendu qu'elles ne se prêtent pas facilement à des flexions de sens contraires pour des divisions très-petites de leur longueur. Il est facile de s'en assurer en tendant sur le monocorde deux cordes de diamètres différents, et en cherchant à produire leurs harmoniques élevés : l'expérience réussit beaucoup mieux avec celle qui a le moindre diamètre. Les cordes les plus favorables à la production des harmoniques élevés sont les fils métalliques très-fins, tels que ceux employés dans la passementerie ; on distingue très-bien ces harmoniques dans la sonorité d'une corde de ce genre, pourvu qu'on ait recours à un mode d'ébranlement pouvant donner une discontinuité brusque, par exemple, soit en frappant, soit en pinçant la corde avec une pointe métallique. Les harmoniques élevés et en grand nombre, qui, dans l'échelle musicale, se trouvent très-voisins les uns des autres, produisent l'impression d'un bruissement non harmonique, d'une hauteur excessive, que nous avons l'habitude de désigner par le mot *tintement*. Les notes qui suivent le septième harmonique, se succèdent par intervalles un peu moindres qu'un ton jusqu'au quatorzième, à partir duquel elles se suivent à un peu moins d'un demi-ton de distance. C'est pourquoi elles constituent une étroite série de sons dissonnants. A l'aide d'un fil de fer très-fin, analogue à ceux qu'on emploie pour les fleurs artificielles, et auquel j'avais donné 7 mètres de long, je suis parvenu à isoler le

dix-septième harmonique. Les sons de la cithare doivent leur caractère particulier à un tintement qui est produit par des harmoniques élevés ; cependant la série de ces derniers ne s'étend pas aussi loin que dans le cas du fil en question, à cause de la moindre longueur des cordes.

Les cordes à boyau sont plus légères, à solidité égale, que les cordes métalliques, et donnent, par conséquent, des notes bien plus élevées. La différence du timbre de ces deux espèces de cordes tient en partie à la légèreté des premières, et surtout à leur élasticité moins parfaite ; ces deux causes font que les sons s'éteignent plus vite, principalement les plus élevés. C'est pourquoi le son des cordes à boyau pincées (*guitare*, *harpe*), est moins sifflant que celui des cordes métalliques.

4. Sons des instruments à archet.

On n'a encore donné aucune théorie mécanique complète du mouvement des cordes ébranlées par l'archet, parce qu'on ignore la manière dont l'archet agit sur leur mouvement. Je suis arrivé cependant, dans la limite du possible, en m'appuyant sur une méthode particulière dont le principe a été trouvé par un physicien français, M. Lissajous, à observer la forme de vibration d'un point isolé d'une corde de violon, et, au moyen de cette forme qui est relativement très-simple, à déterminer le mouvement de la corde entière et l'intensité des harmoniques.

On peut, à travers une loupe dont la lentille convexe présente un fort grossissement, regarder un petit objet lumineux, par exemple, un petit grain d'amidon réfléchissant la lumière d'une flamme, et apparaissant comme un très-petit point brillant. Si la loupe exécute un mouvement de va-et-vient, le petit point brillant restant au repos, ce dernier, vu à travers la loupe, semble lui-même osciller de côté et d'autre. Cette loupe, dans l'appareil que j'ai employé et qui est représenté figure 22, est fixée à l'extrémité d'une des branches du diapason G, et désignée par M. Elle est formée de deux lentilles achromatiques, semblables à celles ordinairement usitées dans l'objectif du microscope. On peut employer ces deux lentilles simplement comme loupe, sans les associer à d'autres verres ; si l'on a besoin d'un plus fort grossissement, on adapte derrière la plaque métallique AA qui supporte le diapason, le tube et l'oculaire d'un microscope dont l'objectif est formé par la lentille en question. Maintenant, si l'on dispose l'instrument, que nous pouvons appeler Microscope à vibrations, de manière à pouvoir nettement distinguer un point lumineux fixe, et qu'on fasse vibrer le diapason, ce dernier imprimera au système de lentilles L un

mouvement de va-et-vient périodique, suivant des vibrations simples pendulaires. L'observateur alors croit voir le point lumineux lui-même se déplacer de côté et d'autre, et, comme les vibrations se succèdent assez rapidement pour que l'impression lumineuse ne puisse

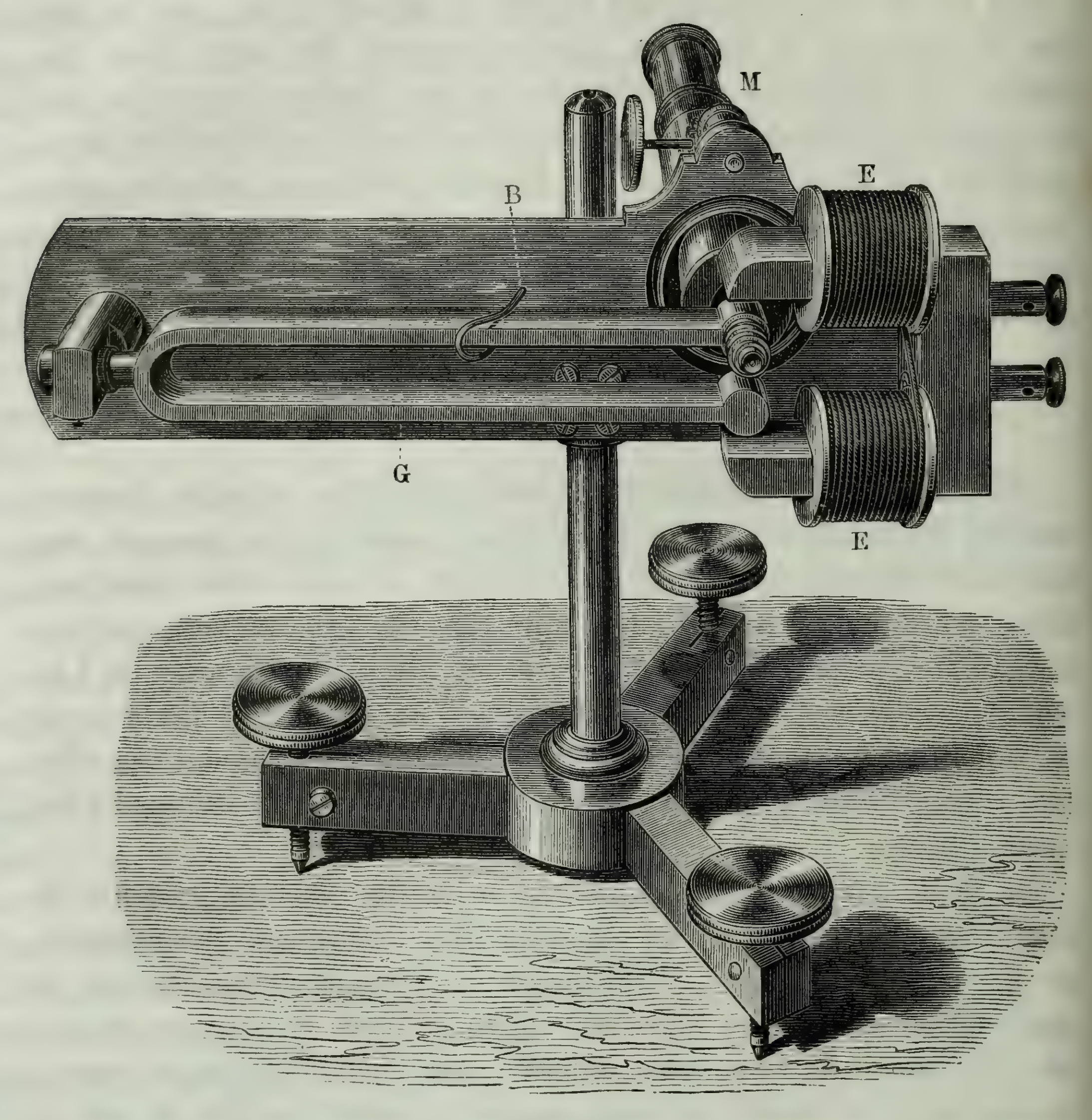


Fig. 22.

s'éteindre dans l'œil pendant la durée d'une vibration, le chemin parcouru par le point brillant fait l'effet d'une ligne droite immobile, d'autant plus longue que l'amplitude de la course du diapason est plus considérable (1).

Le petit grain d'amidon, dont on regarde le reflet, est fixé sur le corps sonore dont on veut étudier les formes de vibration, lequel est

(1) L'extrémité de la seconde branche du diapason est plus épaisse et fait contre-poids à la loupe. Le petit curseur en fer B, monté sur l'une des branches, sert à modifier un peu la hauteur du diapason : en le déplaçant vers l'extrémité de la branche, le son devient plus grave. E est un électro-aimant à l'aide duquel on peut imprimer au diapason des vibrations régulières en faisant traverser les bobines par des courants électriques intermittents, comme on le décrira avec plus de détails dans le chapitre VI.

disposé de manière que le grain oscille horizontalement pour des oscillations verticales du système de lentilles. Si ces deux sortes de mouvements ont lieu simultanément, l'observateur voit le point lumineux osciller à la fois horizontalement, en vertu de son mouvement propre, et verticalement, à cause du mouvement des lentilles de verre; ces deux déplacements se composent alors en un mouvement curviligne. On voit alors apparaître dans le champ du microscope une courbe brillante immobile et invariable, si les durées de vibrations du point brillant et du diapason sont exactement égales, ou si l'une est exactement 2, 3 ou 4 fois aussi grande que l'autre, parce que, dans ce cas, le point lumineux, après une ou plusieurs vibrations, parcourt toujours exactement le chemin précédemment décrit. Si ces rapports numériques ne sont pas exactement observés, les courbes se modifient lentement, et il semble alors, par l'effet de l'illusion produite, qu'elles soient tracées sur la surface latérale d'un cylindre transparent, qui tournerait lentement autour de son axe. Ce mouvement lent de la courbe apparente n'est pas désavantageux, parce qu'il permet à l'observateur de la voir dans ses positions successives. Mais, si le rapport des nombres de vibrations du corps observé et du diapason s'écarte trop des rapports exprimés par de petits nombres entiers, le mouvement de la courbe devient trop rapide pour que l'œil puisse le suivre, et tout s'embrouille.

Si on veut faire servir le microscope à vibrations à l'étude du mouvement d'une corde de violon, on doit fixer sur cette dernière le point brillant dont l'image doit être réfléchie. On commence par noircir avec de l'encre le point considéré de la corde; quand cette dernière est sèche, on l'enduit de cire visqueuse, et on la saupoudre d'un peu d'amidon dont quelques grains restent adhérents à la corde. On fixe le violon en face du microscope, de manière que les cordes soient verticales et qu'en regardant à travers le microscope on voie nettement le reflet d'un des grains d'amidon. On place l'archet sur la corde, parallèlement aux branches du diapason; le point considéré vibre alors horizontalement, et, le diapason se mouvant simultanément, l'observateur voit les courbes caractéristiques. Dans l'expérience, je me servais de la corde la_2 du violon, que j'accordais un peu plus haut, en $si\flat_2$, de manière qu'elle fût exactement à deux octaves au-dessus du diapason de l'appareil qui donnait $si\flat_0$. On a dessiné (*fig.* 23) les courbes de vibrations, telles qu'elles apparaissent dans le microscope à vibrations. La ligne horizontale des figures *aa*, *bb*, *cc*, représente la trajectoire apparente du point lumineux, avant qu'il soit entré en vibrations; les courbes et les zigzags des mêmes figures représentent au contraire sa marche une fois qu'il vibre. On a placé

à côté, en A, B, C, les mêmes formes de vibrations représentées d'après la méthode employée dans le premier et le deuxième chapitre, et où les subdivisions de la base horizontale sont directement proportionnelles aux temps, tandis que, dans les figures *aa*, *bb*, *cc*, les longueurs horizontales sont proportionnelles aux déplacements de la lentille vibrante. A et *aa* représentent les courbes correspondant au diapason, c'est-à-dire, la vibration simple ; B et *bb*, celles du point milieu d'une corde de violon à l'unisson avec le diapason de l'appareil ; C et *cc*, la même courbe pour une corde accordée une octave plus haut. On peut imaginer que les figures *aa*, *bb*, *cc*, sont formées par les figures A, B et C, en supposant le plan de ces dernières en-

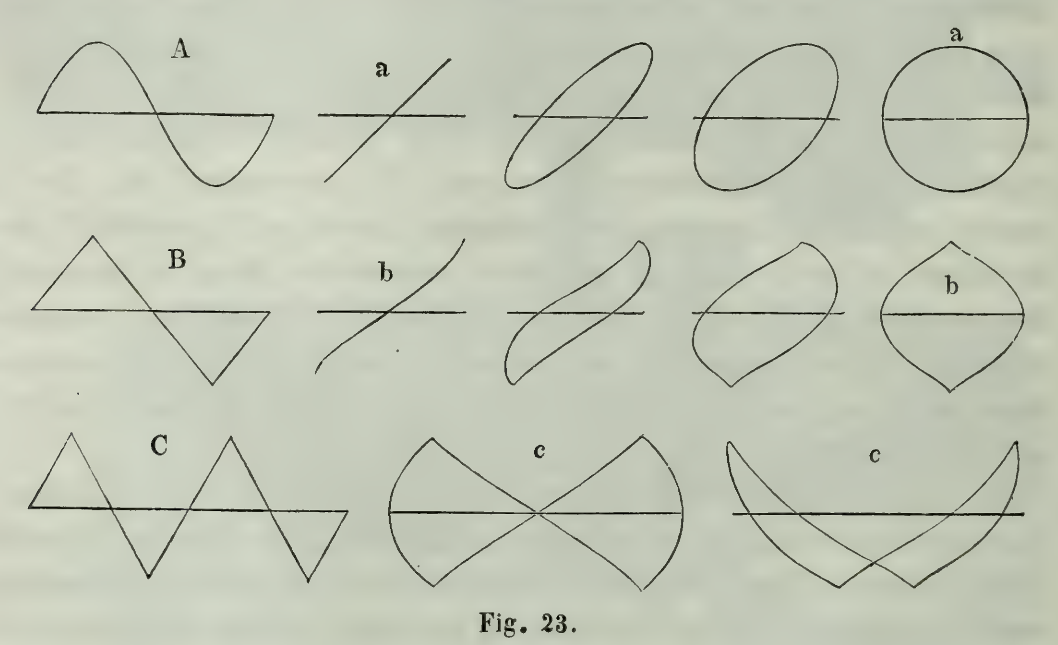


Fig. 23.

roulé autour d'un cylindre transparent, dont le contour serait égal à la base horizontale. La courbe tracée sur le cylindre serait vue par l'observateur d'un point tel, que la perspective du cercle de base du cylindre, formé par l'horizontale enroulée, soit pour lui une ligne droite ; dans ce cas, les perspectives de A, B, C, seraient aussi respectivement pour lui *aa*, *bb*, *cc*. Si les hauteurs des deux corps vibrants ne sont pas dans un rapport exactement harmonique, il semble que le cylindre imaginaire se mette à tourner.

On peut avec la même facilité, en partant des formes *aa*, *bb*, *cc*, retrouver A, B, C, et, comme ces dernières donnent du mouvement de la corde une représentation plus intelligible, je supposerai toujours dans ce qui va suivre, que les courbes apparentes supposées tracées sur la surface du cylindre sont déroulées et étendues sur un plan, ce qui donne des formes analogues à A, B, C. De cette manière, la signification de nos courbes de vibrations est exactement la même que dans les précédents chapitres. S'il y a quatre vibrations de la corde de violon pour

une du diapason, comme c'est le cas dans nos expériences, si, par conséquent, quatre ondes semblent tracées sur le contour du cylindre imaginaire, qu'elles tournent encore avec lenteur, et se placent dans différentes positions, il n'est pas difficile de les représenter développées sur un plan ; car les portions moyennes, sur le cylindre, ont assez exactement l'aspect qu'elles auraient en développement.

Les figures 23, B et C, donnent directement la forme de vibration pour le point milieu d'une corde de violon, bien prise par l'archet, et donnant le son fondamental plein et fort. On voit facilement que cette forme de vibration se distingue essentiellement de celle d'une forme de vibration simple (*fig.* 23 A).

En approchant davantage des extrémités de la corde, la forme de vibration se change en celle représentée (*fig.* 24, A), et les deux divi-

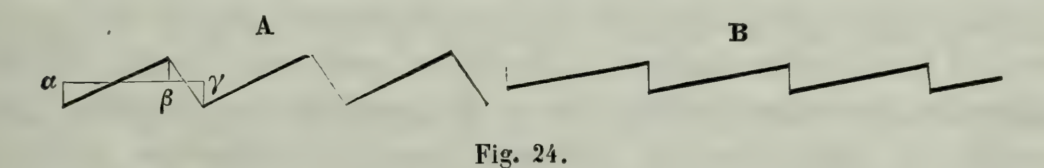


Fig. 24.

sions de chaque onde, α et β, sont entre elles comme les deux portions de la corde situées de part et d'autre du point observé. Dans la figure, le rapport est 1 : 3, parce que l'archet se trouve à 1/4 de la corde à partir de l'extrémité. Tout près de cette extrémité, on obtient la forme 24 B. Les portions les plus courtes de la figure sont si peu éclairées, en raison de la très-grande vitesse du point lumineux, au moment où il les parcourt, qu'elles disparaissent souvent à l'œil, et qu'il ne reste que les parties les plus longues de la ligne brisée.

Ces figures permettent de reconnaître, que chaque point de la corde va et vient avec une vitesse constante entre les positions-limites de sa vibration. Pour le point milieu, la vitesse ascendante est égale à la vitesse descendante. Si on fait agir l'archet près de l'extrémité droite de la corde en tirant, la vitesse descendante, sur la moitié droite de la corde, est inférieure à la vitesse ascendante, et cela d'autant plus qu'on approche davantage de l'extrémité. Sur la moitié gauche, c'est l'inverse. A l'endroit où on attaque la corde, la vitesse descendante du point paraît être égale à celle de l'archet. Pendant la plus grande partie de chaque vibration, la corde adhère à l'archet, est entraînée par lui, puis elle s'échappe brusquement et revient rapidement en arrière, pour être reprise immédiatement par un autre point de l'archet, et ainsi de suite (1).

Nous arrivons maintenant au but que nous nous proposons, savoir, à la détermination des harmoniques. Comme nous connaissons la

(1) Ces faits suffisent pour déterminer complétement le mouvement d'une corde ébranlée par l'archet (*voir* suppl. V).

forme de vibration de chacun des points de la corde, nous pouvons en déduire complétement l'intensité de chacun des sons partiels. Les formules mathématiques sont développées dans le supplément V. Le calcul conduit aux résultats suivants. Si l'archet est bien conduit, la corde présente tous les harmoniques que comporte son degré de rigidité, et leur intensité décroît avec la hauteur. L'amplitude et l'intensité du second son partiel, sont le quart, celles du troisième son le neuvième, du quatrième son le seizième, des éléments correspondants du son fondamental, etc. Le rapport des intensités des harmoniques est le même que sur une corde pincée en son milieu, sauf que, dans ce dernier cas, tous les sons partiels pairs font défaut, tandis qu'au contraire ils prennent naissance sous l'archet. Au reste, il est très-facile d'entendre avec force les harmoniques dans le son du violon, surtout quand on les a préalablement fait sortir isolément. On sait que, pour arriver à ce dernier résultat, on ébranle la corde avec l'archet tout en appuyant légèrement le doigt sur un des nœuds du son considéré. Les cordes de violon donnent facilement jusqu'au sixième son partiel; avec un peu de travail, on obtient même jusqu'au dixième. Les harmoniques graves répondent le mieux, lorsqu'on prend la corde entre le $\frac{1}{10}$ et le $\frac{1}{12}$ de la longueur d'une subdivision vibrante loin de l'extrémité; pour les harmoniques aigus, où les subdivisions vibrantes sont moindres, il faut prendre la corde à peu près entre le $\frac{1}{4}$ et le sixième de leur longueur.

Sur les instruments à archet, le son fondamental est relativement plus fort que sur les cordes, frappées ou pincées dans le voisinage de leur extrémité, du piano ou de la guitare; les premiers harmoniques sont relativement plus faibles, tandis que les sons partiels aigus, du sixième au dixième environ, sont beaucoup plus nets, et produisent le *mordant* particulier aux instruments à archet.

La forme principale des vibrations des cordes de violon, telle qu'elle vient d'être décrite, est, au moins dans ses traits essentiels, sensiblement indépendante de l'endroit où la corde est attaquée, pourvu que celle-ci sonne bien. Cette forme ne varie pas du tout dans la même proportion que celle des cordes frappées ou pincées, d'après la position du point d'attaque. Il se produit cependant, dans la figure représentative de la vibration, de petites différences appréciables qui tiennent à la position de l'archet. Ordinairement, les lignes de la figure présentent de petites dentelures, comme dans la figure 25, dont les jambages croissent en amplitude et en hauteur, à mesure que l'archet s'éloigne de l'extrémité de la corde. Si on attaque la corde en un point

nodal d'un des harmoniques aigus, dans le voisinage du chevalet, ces dentelures se réduisent simplement de manière à faire disparaître du mouvement normal de la corde, précédemment décrit, tous les

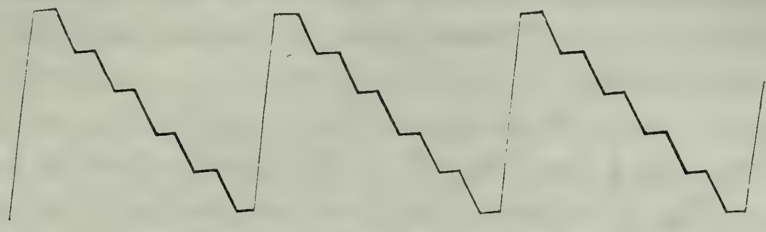


Fig. 25.

sons partiels qui ont un nœud au point considéré. Si on observe la forme de vibration en un des autres points nodaux du son partiel le plus grave, on ne voit pas de ces dentelures. Ainsi, par exemple, si on prend la corde au $\frac{1}{7}$ de sa longueur, à partir du chevalet, et qu'on observe les points situés aux $\frac{6}{7}$, aux $\frac{5}{7}$, aux $\frac{4}{7}$, la forme vibratoire est simple comme dans la figure 24; si, au contraire, on observe entre deux nœuds, on voit des dentelures comme dans la figure 25. Les modifications dans le timbre du son tiennent en partie à cette circonstance. Si on attaque la corde trop près de la touche, qui se termine au $\frac{1}{5}$ de la longueur à partir du chevalet, on fait disparaître le cinquième ou le sixième son partiel, qui, tous deux, sont encore nettement appréciables ordinairement. Le son devient alors un peu plus sourd. La place habituelle de l'archet est environ au $\frac{1}{10}$ de la longueur, un peu plus loin dans le *piano*, un peu plus près dans le *forte*. Si on approche l'archet du chevalet, en n'appuyant que légèrement, il se produit une autre modification dans le son qu'il est facile de reconnaître dans la forme de vibration. C'est en effet un mélange du son fondamental et du premier son harmonique de la corde. Par un mouvement rapide de l'archet pressant légèrement, au $\frac{1}{20}$ environ de la corde à partir du chevalet, on obtient quelquefois isolément l'octave supérieure du son fondamental, parce qu'au milieu de la corde il se produit un nœud. En appuyant fortement l'archet, on fait sortir en même temps le son fondamental. Par une pression intermédiaire, on peut introduire l'octave supérieure dans une proportion quelconque. Tout cela peut également se reconnaître dans la figure représentative de la vibration. La figure 26 représente la série des formes correspondant à ces modifications. On voit, du grand côté d'une éminence d'onde, sortir une nouvelle dent, d'abord petite, puis allant

en croissant, jusqu'à ce que, les nouvelles éminences devenant aussi hautes que les précédentes, le nombre des vibrations soit doublé ; le son passe alors à l'octave. Par cette addition du premier harmonique, le timbre du son le plus grave de la corde devient plus délicat, plus

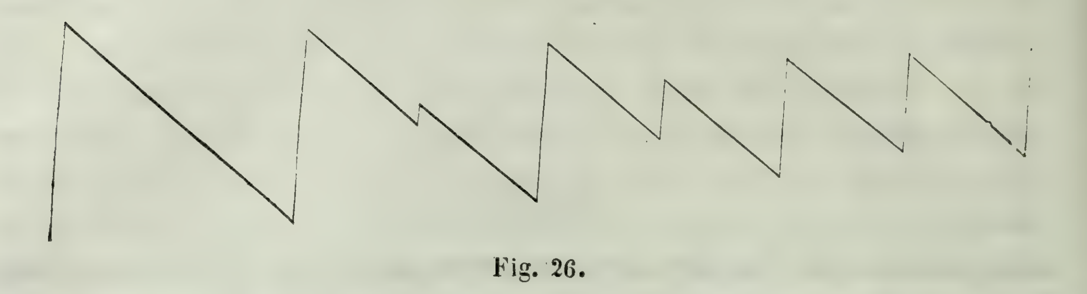


Fig. 26.

éclatant, mais moins plein, moins énergique. C'est, d'ailleurs, un spectacle très-intéressant que d'observer la courbe de vibration, en modifiant peu à peu la conduite de l'archet ; on voit alors, que de légères modifications dans le timbre se traduisent toujours par des modifications très-appréciables dans la forme de la vibration.

Par un maniement très-régulier de l'archet, on peut obtenir toutes les formes décrites ici, représentées par des courbes régulières, immobiles et invariables ; l'instrument donne alors un son musical pur et non interrompu. Au contraire, tout raclement de l'archet peut se reconnaître à des déplacements brusques et discontinus et à des modifications dans la courbe. Si le raclement se prolonge, l'œil n'a plus le temps de saisir une figure régulière. Le bruit du raclement de l'archet peut donc être considéré comme une série d'interruptions irrégulières de la vibration normale qui doit, chaque fois, reprendre avec un nouveau point de départ. Au reste, sur la courbe représentative, les moindres secousses de l'archet, à peine distinguées par l'oreille, sont représentées par de rapides soubresauts. La rapidité des altérations de ce genre, petites ou grandes, dans la régularité de la vibration, paraît être notamment ce qui distingue les bons instruments des mauvais. Sur la corde de mon monocorde qui n'était employé qu'accidentellement comme instrument à archet, il fallait une grande netteté dans l'action de ce dernier, pour obtenir une courbe tranquille, pendant juste assez de temps pour que l'œil pût encore la saisir ; le son était d'ailleurs dur, et le raclement très-fréquent. Sur un très-bon violon moderne de Bausch, au contraire, il était plus facile de maintenir la courbe quelque temps tranquille ; mais j'y parvenais encore beaucoup mieux sur un vieux violon italien de Guadanini ; c'est sur ce dernier que j'ai pu obtenir, pour la première fois, une courbe assez calme pour qu'il me fût possible de compter les petites dentelures. C'est à cette grande régularité dans la vibration qu'il faut évidem-

ment attribuer la pureté de son des anciens instruments, puisque chaque petite irrégularité se traduit immédiatement à l'oreille par quelque chose de dur et de raboteux dans le timbre.

Il est probable ici que la structure de l'instrument, et une élasticité aussi parfaite que possible du bois, favorisent la très-grande régularité des vibrations, et qu'alors il est facile à l'archet d'agir régulièrement; ces deux conditions réunies assurent au son un cours régulier, débarrassé de toute dureté. Mais, d'autre part, grâce à cette grande régularité des vibrations, on peut faire résonner la corde avec plus de force; aussi les bons instruments permettent-ils de donner un mouvement plus énergique à la corde, et toute l'intensité du son se communique à l'air sans déperdition, tandis qu'à chaque imperfection dans l'élasticité du bois, une portion du mouvement est absorbée par le frottement. Une bonne partie de la supériorité des vieux violons pourrait bien résider dans leur âge même et dans le long usage; ces deux circonstances ne pouvant que favoriser le développement de l'élasticité du bois. Mais, évidemment, ce qui fait plus que tout, c'est l'art de bien manier l'archet; on ne peut mieux s'en convaincre qu'en voyant sur les formes de vibrations, à quelle habileté il faut avoir recours pour obtenir un son aussi parfait que possible, pour lui conserver exactement toutes ses particularités. On sait aussi qu'un artiste habile sait tirer un son plein, même d'un instrument médiocre.

Les observations et les déductions présentées jusqu'ici, ne se rapportent qu'aux vibrations des cordes de l'instrument et à l'intensité des harmoniques, en tant que ces derniers sont renfermés dans le mouvement vibratoire composé des cordes. Mais les sons de différentes hauteurs ne se transmettent pas également à l'air, et, par conséquent, n'agissent pas sur l'oreille dans le rapport d'intensité que leur assignerait le mouvement de la corde. La transmission à l'air se fait par les parties résonnantes de l'instrument; comme je l'ai déjà remarqué plus haut, des cordes vibrantes ne communiquent directement à l'air qu'une portion inappréciable de leur mouvement. Les cordes du violon ébranlent d'abord le chevalet sur lequel elles sont fixées. Celui-ci repose, par deux petits supports, sur la partie la plus mobile du couvercle de la caisse, située entre les S du violon. L'un des pieds du chevalet s'appuie sur une base relativement fixe, sur ce qu'on appelle l'*âme*, une petite tige placée entre la table supérieure et la table inférieure. C'est seulement l'autre pied du chevalet qui ébranle les tables élastiques, et, par leur intermédiaire, la masse d'air intérieure à la caisse.

Un espace rempli d'air limité, comme le violon, l'alto et le violoncelle, par des tablettes élastiques en bois, présente certains sons propres

qu'on peut mettre en évidence en soufflant dans les S de la caisse. Dans ces conditions-là, le violon donne l'ut_2, d'après Savart, qui étudiait un instrument de Stradivarius ; Zamminer a retrouvé constamment la même note, même sur des instruments assez défectueux. Pour le violoncelle, Savart trouvait fa_0, et Zamminer sol_0. Suivant le calcul de ce dernier, la caisse de l'alto est accordée un ton plus bas que celle du violon. En appuyant l'oreille sur la partie postérieure de la caisse d'un violon, et en jouant la gamme sur un piano, on trouve que certaines notes, renforcées par la résonnance de l'instrument, éclatent dans l'oreille. Sur un violon de Bausch, on trouvait surtout, de cette manière, deux sons de plus forte résonnance, intermédiaires entre ut_2 — $ut\sharp_2$ et la_2 — $si\flat_2$; sur un alto, j'ai trouvé, d'accord avec Zamminer, ces deux notes toutes deux plus graves d'environ un ton.

Il résulte de ces phénomènes particuliers de résonnance, que les sons des cordes, qui avoisinent les sons propres de la caisse, doivent être relativement plus forts. On le constate nettement sur le violon comme sur le violoncelle, au moins pour le son propre le plus grave, en donnant les notes correspondantes sur la corde. Elles sonnent d'une manière particulièrement pleine ; le son fondamental surtout présente une intensité particulière. Je crois avoir entendu le même effet, à un moindre degré, avec le la_2 du violon qui correspond à un son propre plus aigu.

Comme la note la plus grave du violon est sol_2, parmi les harmoniques des sons de cette corde, il n'y a que les octaves des trois notes les plus graves qui puissent être un peu renforcées par la résonnance du son propre ; au contraire, en général, les sons fondamentaux, des hautes notes surtout, sont favorisés au détriment des harmoniques, parce qu'ils sont plus voisins que ces derniers des sons propres. Il en résulte un effet analogue à ce qui se passe sur le piano, où la structure du marteau favorise la production des harmoniques des notes graves, et affaiblit ceux des notes aiguës. Dans le violoncelle dont la corde la plus grave est ut_0, le son propre le plus fort de la caisse est exactement, comme dans le violon, d'une quarte à une quinte plus haut que celui de la corde la plus grave. Il en résulte des phénomènes de renforcement et d'affaiblissement identiques, mais ayant lieu une douzième plus bas. Dans l'alto, au contraire, les sons les plus favorisés, correspondant à peu près au si_2, ne sont pas situés entre ceux de la première et de la deuxième corde, mais entre ceux de la troisième et de la quatrième, ce qui paraît concorder avec la modification de timbre de cet instrument. On ne peut encore, malheureusement, exprimer en chiffres cette influence des sons propres. Ce maximum de résonnance,

produit par le voisinage des sons propres de la caisse, n'est pas très-prononcé ; autrement il en résulterait une beaucoup plus grande inégalité dans la gamme des instruments à archet, dès qu'on dépasserait la région de leur gamme où sont situés les sons propres. Il faut supposer d'après cela que l'influence de la résonnance, sur les intensités relatives des harmoniques isolés de ces instruments, n'est pas très-frappante.

5. Sons des tuyaux de flûte.

Dans les instruments de cette catégorie, on produit le son en dirigeant un courant d'air contre un orifice à bords généralement tranchants, qui conduit à une cavité remplie d'air. Il faut ranger dans cette classe, indépendamment des bouteilles déjà mentionnées dans le précédent chapitre, et représentées dans la figure 19, les flûtes en général, et la majeure partie des tuyaux d'orgue. Dans la flûte, la masse d'air résonnante est renfermée dans la cavité cylindrique de l'instrument, le souffle arrive de la bouche contre les bords un peu tranchants de l'embouchure. La construction des tuyaux d'orgue est représentée par les deux figures ci-contre. La figure 27 A représente une coupe, suivant la longueur, d'un tuyau de bois rectangulaire, et B figure un tuyau d'étain cylindro-conique. RR désigne, dans les deux cas, les tuyaux qui renferment la masse d'air résonnante, *ab* l'embouchure par où arrive le vent, et qui est terminée à sa partie supérieure par une arête aiguë. Dans la figure 27 A, on voit en K la chambre à air où le vent arrive d'abord en sortant du soufflet; l'air ne peut en sortir que par la fente étroite *cd*, et est poussé exactement contre le tranchant de l'arête. Le tuyau de bois A est ouvert par le haut, il donne un son dont l'onde aérienne est deux fois aussi longue que le conduit RR. L'autre tuyau B est bouché, c'est-à-dire fermé à sa partie supérieure. Il donne un son dont l'onde est quatre fois aussi longue que le conduit RR, et qui, par conséquent, est d'une octave plus bas que le son produit par un tuyau ouvert de même longueur.

De même que pour les tuyaux de ce genre, pour les flûtes, les bouteilles précédemment décrites, les caisses sonores des violons, on peut, en général, avec toute cavité pleine d'air, et munie d'un orifice suffisamment étroit, produire des sons en dirigeant sur cet orifice un courant d'air étroit, en forme de ruban; il faut supposer cet orifice muni de bords assez saillants et tranchants.

C'est le choc de l'air contre ces bords qui donne naissance au son sur tous ces instruments; le courant vient s'y briser, et produit un sifflement ou frôlement particulier, qu'on entend isolément quand il n'y a pas de tuyau adapté, ou quand on perce un orifice semblable

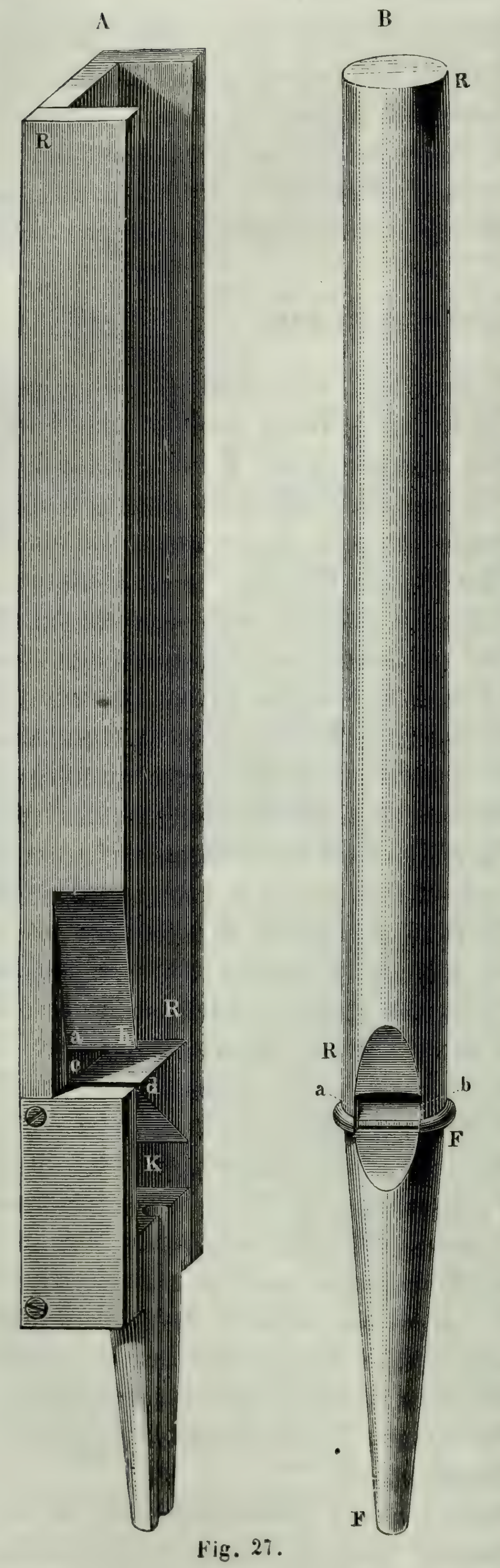


Fig. 27.

sur une planchette. Plus l'orifice est étroit, plus le vent est fort, et plus ce sifflement est aigu. Un bruit de genre doit être considéré, on l'a dit plus haut, comme le mélange d'un grand nombre de sons discordants voisins les uns des autres. La cavité du tuyau vient renforcer, par résonnance, les sons de ce mélange qui correspondent à ses sons propres; ces derniers prennent alors une intensité supérieure à celle de tous les autres, qu'ils couvrent complétement. Aussi, sur tous les instruments de cette nature, entend-on toujours plus ou moins nettement, le frôlement de l'air qui accompagne le son, et qui donne au timbre quelque chose de particulier. On peut de même renforcer le son d'un diapason en l'approchant de l'orifice d'un tuyau, lorsque la hauteur du son du diapason correspond à l'un des sons propres à la masse d'air du tuyau, et on peut, au moyen d'une série de différents diapasons, trouver et déterminer facilement et d'une manière précise les sons propres du tuyau (1).

Au reste le caractère musical du timbre de ces tuyaux dépend essentiellement du fait suivant : les harmoniques du son produit par l'air, sont-ils ou non assez voisins des sons

(1) Aussi, dans mes recherches mathématiques, ai-je proposé de les appeler aussi *sons de plus forte résonnance.* Crelle, *Journal de mathématiques*, vol. LVII.

propres correspondants du tuyau pour pouvoir être renforcés comme le son fondamental ?

Ce n'est que dans les tuyaux cylindriques étroits et ouverts, comme les flûtes, et le registre du violon principal dans l'orgue, que les sons propres aigus du tuyau correspondent exactement aux harmoniques du son fondamental. En soufflant plus fort, ce qui augmente la hauteur du frôlement de l'air, on peut faire parler isolément les sons aigus du tuyau. Une flûte qui, les trous fermés, et avec peu de vent, fait entendre le $ré_2$, donnera $ré_3$ si on souffle plus fort ; si on augmente successivement la force de souffle, on aura successivement le la_3, le $ré_4$, c'est-à-dire, les premier, second, troisième, quatrième harmoniques du $ré_2$. Dans les tuyaux cylindriques, outre le son fondamental, une série d'harmoniques sont renforcés par la résonnance du tuyau, surtout si on souffle avec force, de manière à augmenter beaucoup la hauteur des sons contenus dans le frôlement de l'air. Aussi, sur les jeux de tuyaux cylindriques étroits de l'orgue (*violon principal*, *violoncelle*, *contre-basse*, *viola di gamba*), avec un fort courant d'air, le son fondamental est-il accompagné d'une série d'harmoniques nets et énergiques, ce qui donne au son quelque chose de mordant, analogue au timbre du violon. A l'aide des résonnateurs, je trouve que, dans des tuyaux de ce genre, les sons partiels sont nettement perceptibles jusqu'au sixième. Au contraire, dans les grands tuyaux ouverts cylindriques, les sons propres du tuyau sont tous un peu plus haut que les harmoniques correspondants du son fondamental ; aussi ces derniers sont-ils beaucoup moins renforcés par la résonnance du tuyau. Par la masse d'air plus considérable qu'ils renferment, et par la propriété dont ils jouissent, de ne pas sauter du son à un de ses harmoniques par l'effet d'un courant d'air plus fort, les grands tuyaux forment le fond de la masse sonore de l'orgue, ce qui leur a fait donner le nom de registre *principal;* par suite des causes citées plus haut, le son fondamental seul y est plein et fort, et il n'est accompagné que d'un petit nombre de sons partiels plus faibles. Pour le registre principal des tuyaux en bois, je trouve le premier harmonique, l'octave, très-net, le second, la douzième, déjà faible ; les harmoniques suivants ne sont plus nettement perceptibles. Dans les tuyaux de métal on percevait encore le quatrième son partiel. Le timbre de ces tuyaux est plus plein et plus doux que celui du violon principal. En soufflant doucement dans les jeux de flûte de l'orgue et dans la flûte traversière, on diminue l'intensité des harmoniques dans une plus forte proportion que celle du fondamental, et le son devient faible et doux.

Une autre modification se rencontre dans les registres où les tuyaux sont terminés en forme de cônes (tuyaux à biseau).

Leur orifice supérieur a généralement la moitié du diamètre de la section inférieure; il y en a de plus ou moins larges. C'est le Salicional qui a la plus faible section et le Gemshorn (1) qui a la plus grande pour une même longueur. Ce qui caractérise ces registres, à ce que je trouve, c'est que quelques sons partiels aigus, du cinquième au huitième, sont relativement plus nets que les harmoniques graves. Cette circonstance rend le son creux, mais particulièrement éclatant.

Les tuyaux cylindriques fermés, d'un petit modèle, présentent des sons propres qui correspondent aux sons partiels impairs du son fondamental, c'est-à-dire au troisième ou à la douzième, au cinquième ou à la tierce au-dessus, etc.. Dans les grands tuyaux fermés, comme dans les grands tuyaux ouverts, les sons propres de la masse d'air qui y est renfermée sont sensiblement plus aigus que les harmoniques correspondants du son fondamental émis à l'embouchure; aussi ces derniers ne sont-ils que peu ou point renforcés. Les grands tuyaux bouchés donnent, par conséquent, le son fondamental presque pur, surtout si on souffle doucement, et nous les avons déjà cités comme exemples de sons simples. Les tuyaux bouchés plus petits font encore entendre très-nettement la douzième, ce qui leur a fait donner le nom de Quintaton (*quintam tenens*). Au reste, le cinquième son partiel y est aussi très-net, surtout si on souffle avec force.

Dans ce qu'on appelle les *jeux de flûte* (2), le timbre subit une autre modification. Ici à chaque extrémité du tuyau fermé, le couvercle est traversé par un petit tuyau ouvert aussi long, dans les modèles que j'ai étudiés, qu'un tuyau ouvert qui donnerait le cinquième son partiel du son du jeu de flûte. Aussi, le cinquième son partiel y est-il relativement plus fort que le troisième, assez faible d'ailleurs, ce qui donne au timbre quelque chose de particulièrement éclatant. Comparé à celui des tuyaux ouverts, le son des tuyaux fermés, auquel manquent les sons partiels pairs, a quelque chose de creux; les grands registres bouchés donnent un son sourd, surtout dans le bas, doux et peu énergique.

Mais, par leur douceur même, ils forment un contraste très-saisissant avec les timbres plus mordants des petits tuyaux ouverts, et du registre bruyant des jeux de fourniture dont il a été question plus haut, formés, comme on sait, par l'assemblage pour un seul son, de plusieurs tuyaux qui en donnent les harmoniques.

Les tuyaux de bois ne donnent pas un frôlement aussi aigu que les tuyaux de métal; leurs parois ne renvoient pas aussi bien la trépidation des ondes sonores; d'où il semble résulter que les vibrations des

(1) Registre non usité en France.

(2) Tuyaux à cheminée.

sons aigus sont plus facilement anéanties par le frottement. Aussi le bois donne-t-il un timbre plus doux ou plus sombre, moins mordant.

Le caractère général de tous ces jeux est, en outre, de donner facilement le son; aussi se prêtent-ils bien à un dessin mélodique très-rapide, mais l'intensité du son ne comporte pour ainsi dire pas de modification, parce qu'un faible accroissement dans la force du souffle élève déjà notablement la hauteur. Sur l'orgue, par conséquent, le *forte* et le *piano* ne peuvent être obtenus qu'en tirant des registres qui ouvrent plus ou moins de tuyaux, d'un timbre fort et mordant, ou bien doux et faible. Aussi les moyens d'expression sont-ils restreints sur cet instrument, mais, d'un autre côté, il doit évidemment une partie de son action particulièrement grandiose, à cette circonstance que le son y présente une intensité invariable, à l'abri et au-dessus des excitations subjectives.

6. Sons des tuyaux à anche.

Le son des instruments de cette catégorie se produit de même que sur la sirène; l'accès du tuyau est successivement ouvert et fermé au courant d'air, en sorte que ce dernier se subdivise lui-même en une série de secousses isolées imprimées au gaz. Dans la sirène, cet effet se produit, comme nous l'avons dit plus haut, au moyen d'un disque tournant percé de trous; dans les instruments à anche, ce sont des plaques élastiques ou des membranes qui, entrant en vibrations, ouvrent et ferment alternativement l'orifice sur lequel elles sont fixées. A cette catégorie appartiennent :

1° Les tuyaux à anche de l'orgue et l'harmonium. Leurs anches représentées en perspective (*fig.* 28, A), et en coupe (*fig.* 28, B), sont de petites lames métalliques rectangulaires zz fixées sur une

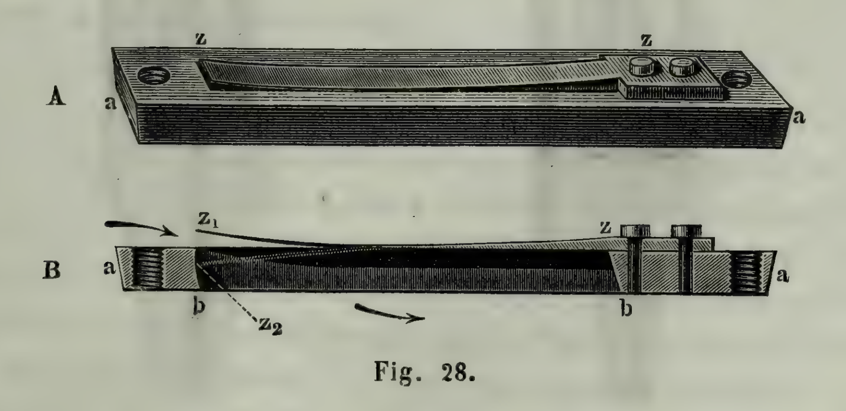


Fig. 28.

plaque plane a, percée elle-même d'une ouverture b de même forme et de même dimension que l'anche. Quand celle-ci est au repos, elle ferme l'ouverture complétement, en laissant seulement sur ses

bords une fente aussi étroite que possible. Quand elle entre en vibrations, elle oscille entre les deux positions désignées par z_1 et z_2, dans la figure 28. Dans la position z_1, comme on voit, l'air trouve un passage dont le sens est indiqué par la flèche; dans la position z_2, l'ouverture est fermée par l'anche. L'anche représentée ici est l'*anche libre*, le plus généralement employée aujourd'hui. Ces anches sont un peu plus petites que l'ouverture qu'elles ferment, de manière à pouvoir s'y mouvoir sans en toucher les bords. Autrefois on employait des anches *battantes* qui, à chaque vibration, frappaient contre leur cadre; mais elles ne sont plus employées à cause de leur son trop criard et bruyant.

Le mode de fixation des anches dans les registres de l'orgue est

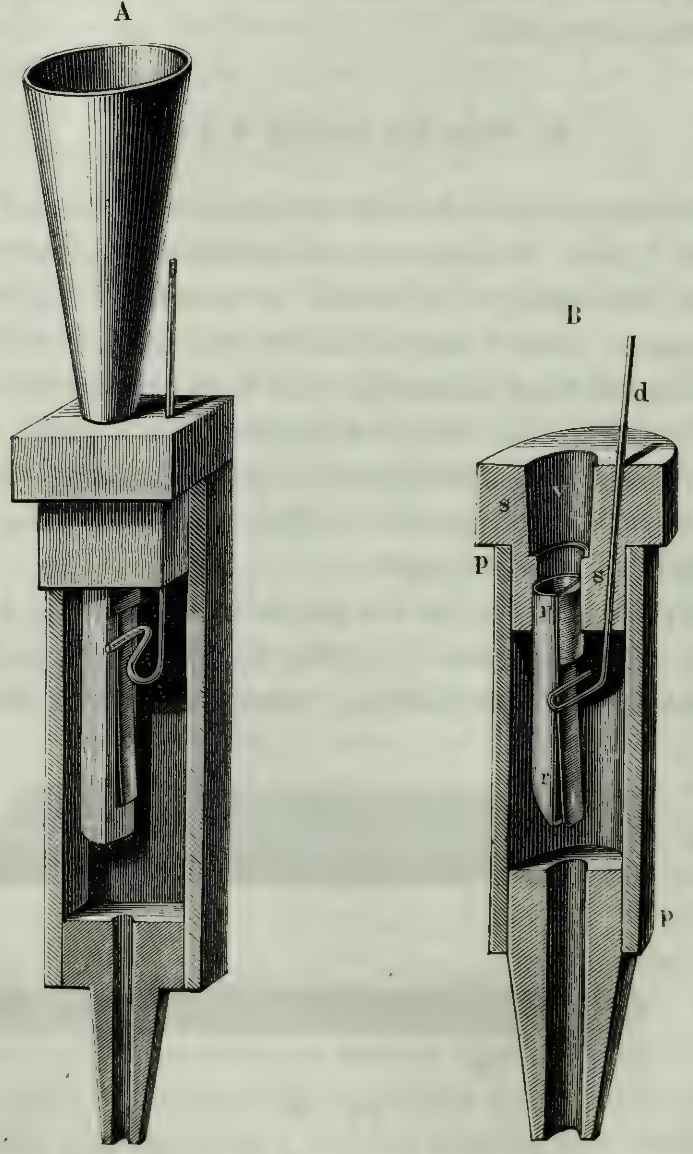


Fig. 29.

représenté dans les figures 29, A et B. A porte, à sa partie supérieure, un cornet acoustique ; B est supposé fendu suivant sa longueur ;

pp est le tuyau où le vent arrive par en bas; l'anche *l* est dans la rigole *r*, fixée elle-même dans le couvercle de bois *s*; *d* est le curseur. Celui-ci presse par en bas sur l'anche; si on l'enfonce, il la raccourcit, ce qui élève le son ; le contraire se produit si on le tire vers le haut. On peut ainsi produire facilement et à volonté de petites modifications dans la hauteur du son.

2° Les anches de la clarinette, du hautbois et du basson, taillées dans des plaques élastiques, présentent une construction analogue. La clarinette a seulement une anche large, qui est fixée devant une ouverture correspondant à l'embouchure, comme dans les anches métalliques précédemment décrites, et qui battrait si l'amplitude de sa course était grande. Mais cette amplitude est faible et, par la pression des lèvres, l'anche est seulement rapprochée de son cadre de manière à rétrécir suffisamment la fente, sans battre contre les bords. Dans le hautbois et le basson, il y a, à l'embouchure, deux anches de ce genre placées l'une contre l'autre ; elles sont séparées par une faible distance, et le courant d'air qui passe au milieu les force à fermer la fente à chaque vibration.

3° Anches membraneuses.

La meilleure manière d'étudier leurs particularités consiste à construire artificiellement des anches de ce genre. A cet effet, on coupe l'extrémité supérieure d'un tube en bois ou en caoutchouc, suivant deux plans obliques, comme le montre la figure 30, de manière qu'il reste deux saillies à peu près rectangulaires entre les plans des deux sections. On place alors deux bandelettes de caoutchouc vulcanisé, peu tendues, sur les deux sections obliques, de manière à laisser entre elles, à la partie supérieure, une fente étroite, et on les entoure d'un fil. De cette manière, on forme une embouchure à anche, que l'on peut associer à volonté à des tuyaux, ou à d'autres cavités remplies d'air. Dans la vibration, les membranes ouvrent ou ferment la fente en se rapprochant ou en s'éloignant l'une de l'autre. Des membranes ainsi disposées obliquement, parlent beaucoup plus facilement que lorsqu'on les place perpendiculairement à l'axe du tuyau, comme l'a proposé J. Müller; car alors elles ne peuvent ouvrir et fermer alternativement le passage qu'après avoir été infléchies par la pression de l'air. Pour des anches membraneuses de ce genre, on peut diriger le courant d'air aussi bien dans le sens des flèches, que dans le sens

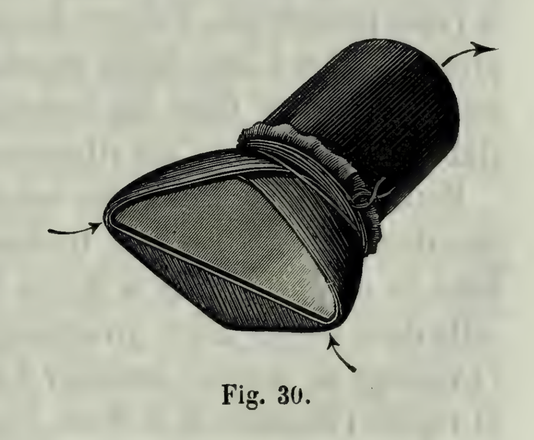


Fig. 30.

opposé. Dans le premier cas, la fente est ouverte par les anches au moment où celles-ci se dirigent vers le réservoir à air, et par conséquent vers le fond du tuyau. J'appellerai anches *en dedans* des anches de cette nature ; elles donnent toujours des sons plus graves que si on les faisait vibrer librement, sans les relier à un espace rempli d'air. Les anches déjà énumérées des tuyaux d'orgue, de l'harmonium et des instruments de bois, sont toujours disposées de cette manière. Mais on peut aussi opposer les anches membraneuses ou métalliques au courant d'air, de manière qu'elles lui laissent le passage libre, lorsqu'elles se dirigent vers l'extérieur de l'instrument. Je les appelle alors *anches en dehors*. Les sons des anches en dehors sont constamment plus aigus que ceux des anches isolées.

Comme instruments de musique, il y a lieu de considérer deux sortes d'anches membraneuses; ce sont les lèvres humaines dans le jeu des instruments de cuivre, et les cordes vocales du gosier dans le chant.

Il faut considérer les lèvres comme des anches membraneuses très-faiblement élastiques, formées par un grand nombre de tissus humides, et qui, à cause de cela, ne vibreraient relativement qu'avec beaucoup de lenteur, si on pouvait les employer isolément. Dans les instruments de cuivre, elles forment des anches en dehors qui, d'après la règle précédente, doivent donner des sons plus aigus que leur son propre. Grâce à leur faible résistance, elles sont mises en mouvement assez facilement dans les instruments de cuivre, par la pression variable des colonnes d'air vibrantes.

Dans le gosier, les cordes vocales élastiques jouent le rôle d'anches membraneuses. Elles sont tendues d'avant en arrière, comme les rubans de caoutchouc de la figure 30, et laissent entre elles une fente, celle de la glotte. Elles présentent, sur toutes les anches artificielles, l'avantage de pouvoir modifier d'une manière extraordinairement sûre et rapide l'étendue de la fente, leur tension et même leur forme ; ajoutons à cela les grandes modifications dont est susceptible la cavité de la bouche. Il en résulte que la voix humaine peut produire une bien plus grande variété de sons que n'importe quel instrument. Si on examine au laryngoscope, les cordes vocales pendant la production du son, on les voit exécuter des vibrations très-sensibles, surtout pour les notes graves de poitrine ; l'ouverture de la glotte se trouve entièrement fermée, chaque fois que les cordes vocales se meuvent vers l'intérieur du corps.

La hauteur des divers instruments à anches énumérés ici peut être modifiée au moyen de procédés très-différents. Les anches métalliques de l'orgue et de l'harmonium ne sont jamais destinées qu'à la produc-

tion d'un seul son. La pression de l'air mis en vibration influe très-peu sur le mouvement de ces anches, relativement lourdes et rigides, en sorte que la hauteur des sons émis par elles à l'intérieur de l'instrument, diffère généralement peu de celle que donnerait l'anche abandonnée librement à elle-même. Ces instruments doivent avoir au moins une anche pour chaque note.

Dans les instruments de bois, nous n'avons qu'une seule anche qui doit servir à toute la série des notes. Les anches de ces instruments sont faites d'un bois léger, élastique, facilement mis en mouvement par la pression variable de la masse vibrante, et communiquant les vibrations à l'air. Aussi les instruments dont il s'agit, peuvent-ils donner, indépendamment des sons très-élevés correspondant aux sons propres de leur anche, comme le montre la théorie, d'accord avec l'expérience (1), d'autres sons beaucoup plus graves, et dont la hauteur est déterminée par ce fait que les ondes qui prennent naissance dans l'instrument, à la partie où se trouve l'anche, peuvent déterminer dans la pression de l'air des variations suffisamment fortes, pour imprimer à l'anche elle-même un mouvement appréciable. Dans une colonne d'air vibrante, le lieu du maximum de la variation de pression correspond à celui du minimum de la vitesse des molécules d'air ; et comme, à l'extrémité d'un tube fermé, analogue aux tuyaux bouchés de l'orgue, la vitesse est toujours nulle, c'est-à-dire *minima*, et, par suite, la variation de pression *maxima*, en ce point, les sons dont il s'agit sont ceux que donnerait le tube fermé à l'endroit de l'anche, et fonctionnant comme un tuyau bouché. Dans la pratique musicale, on n'emploie presque jamais les sons correspondant aux sons propres de l'anche, parce qu'ils sont très-aigus, grinçants, et que leur hauteur n'est pas suffisamment constante lorsque l'anche devient humide ; on ne produit guère, que les sons plus graves que le son propre de l'anche, dont la hauteur dépend de la longueur de la colonne d'air, et correspond aux sons propres du tuyau fermé.

La clarinette a un tube cylindrique dont les sons propres correspondent aux troisième, cinquième, septième, huitième sons partiels du son fondamental. En modifiant la force du souffle, on peut passer du son fondamental à la douzième ou à la tierce supérieure, indépendamment des changements qu'on apporte à la longueur acoustique du tuyau, en ouvrant les trous latéraux de la clarinette; la colonne d'air qui vibre dans ce dernier cas, se réduit alors à la partie comprise entre l'embouchure et le premier trou ouvert.

(1) Voir Helmholtz, *Comptes rendus de la Société de médecine et d'histoire naturelle d'Heidelberg*, du 26 juillet 1861, *Annuaire d'Heidelberg*. — *Annales de Poggendorff*, 1861.

Le hautbois et le basson ont des tuyaux coniques. Des tuyaux de ce genre, fermés au sommet du cône, ont des sons propres qui correspondent à ceux des tuyaux ouverts de même longueur. Aussi les sons de ces deux instruments correspondent-ils très-exactement à ceux des tuyaux ouverts. En forçant le souffle, on obtient l'octave, la douzième, la double octave du son fondamental. Les sons intermédiaires s'obtiennent en ouvrant les trous latéraux.

L'ancien cor et la trompette consistent en un long tube conique enroulé sur lui-même, sans clefs ni trous ; ils ne peuvent donner que les sons qui correspondent aux sons propres du tube ; ces derniers coïncident ici avec les harmoniques naturels du son fondamental. Mais comme le son fondamental d'un si long tube est très-grave, dans les régions moyennes de la gamme, les harmoniques sont assez voisins les uns des autres pour donner la plupart des degrés de la gamme, surtout dans le cor dont le tube est très-long (1). La trompette ne peut donner absolument que ces harmoniques naturels.

On peut compléter, dans une certaine mesure, la série des sons de la gamme, ou améliorer les sons faux, en enfonçant le poing dans le pavillon, pour le cor, et, pour le trombone, en allongeant ou raccourcissant le tube. Récemment, on a muni la trompette et le cor d'un grand nombre de clefs, pour compléter la gamme, mais la force du son et l'éclat du timbre en souffrent dans une certaine mesure. Dans ces instruments, les vibrations de l'air présentent une énergie peu commune et les tubes solides, polis, non percés de trous, peuvent seuls leur opposer une résistance assez grande, pour qu'elles ne perdent rien de leur force. Dans l'emploi des instruments de cuivre, la forme et la tension variables des lèvres de l'instrumentiste n'entrent en considération, que parce qu'elles déterminent le son propre du tube qui doit résonner, sans agir en rien sur la hauteur de chacun des sons propres.

Dans le gosier humain, au contraire, la tension des cordes vocales qui forment les anches membraneuses, modifie et détermine la hauteur du son. Les cavités pleines d'air, reliées au gosier, ne sont pas aptes à modifier d'une manière considérable le son des cordes vocales ; leurs parois sont en effet trop molles, pour que les vibrations aériennes qui s'y produisent, puissent imposer aux cordes vocales une période vibratoire déterminée, qui ne concorde pas avec celle résultant de leur élasticité propre. La cavité de la bouche est aussi une caisse résonnante trop courte, et généralement trop largement ouverte, pour que

(1) Le tube du cor de chasse a, d'après Zamminer, 27 pieds (18m,77) de long ; le son fondamental propre est le *mi*♭$_{-1}$, qui n'est pas employé, non plus que son premier harmonique *mi*♭$_0$; les sons dont on fait usage sont *si*♭$_0$, *mi*♭$_1$, *sol*$_1$, *si*♭$_1$, *ré*♭$_2$, *mi*♭$_2$, *fa*$_2$, *sol*$_2$, *la*♭$_2$, *la*$_2$, *si*♭$_2$, etc.

l'air qui y est renfermé puisse exercer une influence essentielle sur la hauteur.

Indépendamment de la modification de la tension des cordes vocales, tension qui peut être augmentée non-seulement par l'écartement de leurs points d'attache sur les cartilages du gosier, mais aussi par la tension volontaire des fibres musculaires qu'elles contiennent, l'épaisseur de ces cordes paraît aussi pouvoir se modifier. Au-dessous des fibrilles particulièrement élastiques des cordes vocales se trouve un tissu très-mou, humide, non élastique, qui, vraisemblablement, joue un rôle, dans la voix de poitrine, en chargeant les cordons élastiques, et en ralentissant leurs vibrations. La voix de tête prend vraisemblablement naissance lorsque la membrane muqueuse située entre les cordes vocales est tirée de côté, ce qui rend plus tranchant le bord des cordons, diminue le poids de la partie vibrante, tandis que l'élasticité reste la même.

Nous arrivons maintenant au sujet qui nous préoccupe ici, au timbre des instruments à anche. Le son y est produit par les secousses intermittentes imprimées à l'air à chaque vibration, lorsque l'anche lui ferme le passage. Une anche, vibrant librement, a une surface beaucoup trop petite pour pouvoir déterminer dans l'air une quantité de mouvement sonore appréciable ; il en est de même dans les tuyaux. Le son se produit bien plutôt par l'effet des secousses aériennes, comme dans la sirène, où le disque métallique n'exécute point de vibrations. L'ouverture et la fermeture alternatives du canal de l'instrument, transforment le courant d'air continu en mouvement alternatif périodique, susceptible d'agir sur l'oreille. Comme tout mouvement périodique, il peut se diviser en une série de vibrations simples. On a déjà remarqué plus haut que le nombre des termes de la série est d'autant plus considérable, que le mouvement qu'il s'agit de décomposer est plus discontinu. C'est là ce qui se produit, à un haut degré, dans le mouvement de l'air qui traverse la sirène, ou qui frappe une anche, parce que les secousses aériennes isolées sont séparées les unes des autres par des pauses complètes, pendant l'intervalle de temps où l'orifice est fermé. Des anches, résonnant librement, non associées à des tuyaux, pour lesquelles tous les sons simples isolés du mouvement déterminé par elles dans l'air, passent immédiatement et librement dans l'atmosphère, ces anches, dis-je, ont toujours un son très-aigre, très-mordant ou très-grinçant, et, en réalité, que l'oreille soit ou non armée du résonnateur, on entend nettement résonner, et avec force, une longue série d'harmoniques allant jusqu'au seizième ou au vingtième ; on y trouve même des harmoniques plus aigus, quoiqu'il soit difficile ou même impossible de les distinguer, parce

qu'ils sont distants les uns des autres de moins d'un demi-ton. Cette confusion de sons discordants rend le son des anches libres très-désagréable. Cette nature de son nous montre aussi, d'une manière précise, quelle est ici la source sonore. Avec le microscope à vibrations, d'après la méthode de Lissajous, j'ai observé le mouvement vibratoire d'une anche analogue à celle de la figure 29, pour déterminer la forme de la vibration, et j'ai trouvé que l'anche exécute des vibrations simples tout à fait régulières. Aussi ne pourrait-elle produire dans l'air qu'un son simple, et non un son complexe, si le mouvement vibratoire était en réalité directement produit par la vibration de l'anche.

Au reste, la force des harmoniques, donnés par une anche isolée, et leur relation avec le son fondamental, dépendent beaucoup de la nature de l'anche, de sa position dans le cadre, de l'épaisseur qu'elle ferme, etc. Les anches battantes, qui donnent les secousses les plus discontinues, donnent aussi le son le plus aigre. Plus les secousses aériennes sont brèves et brusques, plus les harmoniques doivent être aigus, exactement comme dans le cas des recherches de Seebeck sur la sirène. Une substance, dure et rigide comme le laiton, rendra les secousses aériennes plus distinctes qu'une matière molle et flexible. C'est là, vraisemblablement, qu'il faut surtout chercher l'explication de la douceur qui distingue les sons émis par une belle voix humaine, de ceux de tous les instruments à anches. Et cependant la voix humaine aussi, surtout dans le *forte*, présente un très-grand nombre d'harmoniques aigus, qui sont encore très-nets et très-énergiques dans l'octave d'indice 5; nous y reviendrons plus tard. — Les tubes de résonnance, associés aux anches, en modifient essentiellement le son, en renforçant considérablement les harmoniques correspondant à leurs sons propres, exactement comme cela se passe dans les tuyaux d'orgue avec les sons contenus dans le frôlement de l'air. Les tuyaux doivent être considérés comme fermés à l'endroit de l'anche (1).

J'ai employé, comme caisse résonnante d'une anche de laiton, analogue à celles de l'orgue, et qui donnait le $si\flat_1$, un de mes plus grands résonnateurs qui était précisément accordé en $si\flat_1$. Après avoir élevé considérablement la pression dans le réservoir d'air du soufflet, l'anche rendit un son un peu plus grave que précédemment, mais j'avais un son extraordinairement plein, fort, beau et doux, auquel manquaient presque tous les harmoniques. J'employais ici de l'air en petite quantité, mais sous une forte pression. Le son fondamental de l'anche était seul ici à l'unisson de la sphère fortement résonnante, ce

(1) Voir Supplément VI.

qui lui donnait une grande puissance. Aucun des harmoniques aigus ne pouvait être renforcé. La théorie des vibrations de l'air dans la sphère, montre que la plus forte pression s'y produit toujours au moment où l'anche s'ouvre. Aussi la pression dans le réservoir doit-elle être nécessairement plus forte, pour surpasser le maximum de la pression dans la sphère ; malgré cette pression, la quantité d'air qui passait, était très-peu considérable.

Quand, au lieu d'un résonnateur, on fait usage d'autres caisses résonnantes qui présentent un plus grand nombre de sons propres, on obtient aussi un son plus complexe. Dans la clarinette, nous avons un tuyau cylindrique qui renforce les sons partiels impairs. Les tuyaux coniques du hautbois, du basson, de la trompette et du cor, renforcent tous les harmoniques jusqu'à une certaine hauteur. Pour les ondes sonores, dont la longueur ne dépasse pas sensiblement l'écartement des orifices, les tuyaux ne donnent plus de résonnance. Je n'ai trouvé, dans le son de la clarinette, que des sons partiels de rang impair, tandis que le son des autres instruments à tuyau conique présente aussi les sons partiels pairs. Mais, jusqu'à présent, je n'ai pas eu occasion d'observer les variétés du son sur chacun des instruments à tuyau conique. C'est là un assez vaste champ d'investigation, parce que le timbre se modifie beaucoup avec la manière de souffler; il y a plus, sur un même instrument, les diverses parties de la gamme présentent des timbres assez différents, lorsqu'il y a lieu d'ouvrir les trous latéraux. Ces différences sont particulièrement frappantes sur les instruments de bois. En ouvrant les trous latéraux, on ne compense jamais complétement le raccourcissement du tuyau, et la réflexion de l'onde sonore ne s'y produit pas comme à l'extrémité libre et ouverte du tuyau. Les harmoniques d'un tuyau limité par un trou latéral ouvert, devront généralement s'écarter considérablement de la justesse harmonique, ce qui influera sensiblement sur la résonnance.

7. Sons des voyelles.

Nous avons, jusqu'ici, traité de la résonnance dans les cas où la caisse résonnante était à même de renforcer le fondamental, et, en outre, un certain nombre des harmoniques du son considéré. Il peut encore arriver, que le son le plus grave de la caisse résonnante corresponde non plus au fondamental, mais à l'un des harmoniques du son émis.

Dans ce cas, d'après les propositions développées précédemment, nous devons trouver que l'harmonique en question est plus renforcé par la résonnance que le fondamental et les autres harmoniques, et,

par conséquent, se détache de l'ensemble avec une énergie particulière. Le son prend alors un caractère particulier; il devient plus ou moins semblable à l'une des voyelles de la voix humaine. Ces dernières sont, en effet, des sons produits par des anches membraneuses, les cordes vocales, et dont la caisse résonnante, c'est-à-dire la bouche, peut prendre une largeur, une longueur et un ton variables, de manière à renforcer tantôt l'un, tantôt l'autre des sons partiels (1).

Pour se rendre compte de la composition des voyelles, il faut d'abord remarquer que le son prend son origine dans les cordes vocales; celles-ci, quand la voix résonne avec force, agissent comme des anches membraneuses, et, comme toutes les anches de ce genre, produisent une série de secousses aériennes discontinues, nettement séparées, qui, considérées comme une somme de vibrations pendulaires, correspondent à un très-grand nombre de vibrations de cette nature, et font, par conséquent, sur l'oreille, l'effet d'un son formé d'une assez longue série d'harmoniques. Avec le secours des résonnateurs, on peut reconnaître, dans les notes graves de la voix de basse, chantées avec force sur des voyelles éclatantes, des harmoniques très-aigus, allant même jusqu'au seizième; et, dans l'émission un peu forcée des notes aiguës de toute voix humaine, les harmoniques aigus apparaissent plus nettement que sur tout autre instrument, à partir du milieu de l'octave d'indice 5 (le plus élevé des nouveaux pianos), dont nous exposerons plus bas encore les relations particulières avec l'oreille. L'intensité des harmoniques, surtout des plus élevés, est d'ailleurs soumise à d'assez grandes variétés individuelles. Chez les voix mordantes et éclatantes, elle est plus grande que chez les voix douces et sombres. Le timbre particulier des voix mordantes tire peut-être son origine de ce que les bords des cordes vocales ne sont pas assez polis ou assez droits, pour pouvoir former entre eux une fente étroite rectiligne sans se heurter l'un à l'autre, ce qui rapproche davantage le gosier des instruments à anche battante qui ont un timbre beaucoup plus mordant, tandis que, normalement, les cordes vocales sont des anches libres. Les voix voilées proviennent peut-être de ce que l'orifice de la glotte ne se ferme jamais exactement, pendant la vibration des cordes vocales. Au moins on obtient, avec des anches membraneuses artificielles, des modifications analogues dans le son, lorsqu'on change de cette manière la position relative des anches. Pour la production d'un

(1) La théorie des voyelles a été posée pour la première fois par Wheatstone, dans une critique, malheureusement peu connue, des expériences de Willis. Ces expériences sont décrites dans les *Transact. of Cambridge Phil. Soc.*, t. III, p. 231. — *Poggend. Annalen der Physik*, Bd. XXIV, p. 397. — L'appréciation de Wheatstone se trouve dans la *London and Westminster Review*, 1837, octobre.

son plein et cependant doux, il faut nécessairement que les cordes vocales, qui vibrent avec le plus de force aux instants où elles se rapprochent, puissent se placer en ligne droite, tout près l'une de l'autre, de manière à fermer momentanément la glotte d'une manière complète, sans pourtant s'entre-choquer. Si la glotte n'est pas complétement fermée, le courant d'air n'est pas complétement interrompu et le son ne peut être fort. Quand les cordes vocales s'entre-choquent, le son doit devenir mordant comme celui des anches battantes. En examinant au laryngoscope les cordes vocales pendant qu'elles résonnent, on est frappé de voir avec quelle précision elles se ferment, pendant les vibrations dont l'amplitude embrasse presque tout le jeu des cordons.

On trouve d'ailleurs une certaine différence entre l'émission de la voix parlée et celle de la voix chantée, en vertu de laquelle nous produisons, en parlant, un son beaucoup plus mordant, surtout sur les voyelles ouvertes, et nous sentons une plus forte pression dans le gosier. Je présume qu'en parlant, les cordes fonctionnent comme anches battantes.

Lorsque la membrane muqueuse du gosier est affectée de catarrhe, on voit, quelquefois, au moyen du laryngoscope, de petites mucosités entrer dans la glotte. Quand elles sont trop grosses, elles troublent le mouvement des cordes vibrantes et y déterminent des irrégularités, ce qui rend aussi le son irrégulier, roulant ou voilé. C'est d'ailleurs une chose digne de remarque, que la grandeur relative des mucosités qui peuvent se trouver sur la glotte, sans altérer le son d'une manière très-frappante.

On a déjà dit qu'avec l'aide de l'oreille seule, il est généralement beaucoup plus difficile de distinguer les harmoniques de la voix humaine, que ceux des autres instruments ; dans cette recherche, les résonnateurs sont plus nécessaires que dans l'analyse de tout autre son. Cependant, des observateurs attentifs ont quelquefois pu percevoir des harmoniques ; Rameau a reconnu leur existence dès le commencement du siècle dernier, et, plus récemment, Seiler de Leipzig raconte qu'en écoutant attentivement le chant du veilleur, pendant des nuits sans sommeil, il avait quelquefois entendu, dans le lointain, la douzième avant le son fondamental. Cette difficulté doit provenir de ce que, pendant toute notre vie, nous avons suivi et observé les sons de la voix humaine, plus attentivement que n'importe quels autres, mais toujours dans le but de les considérer comme un tout, et d'apprendre à distinguer exactement et à percevoir les nombreuses modifications de leur timbre.

Nous pouvons bien admettre que, dans les sons du gosier humain,

comme dans ceux des autres instruments à anche, l'intensité des harmoniques diminuerait d'une manière continue pour une hauteur croissante, si on pouvait les observer, abstraction faite de la résonnance produite par la cavité de la bouche. En réalité, cette hypothèse correspond assez bien aux voyelles émises, la bouche étant largement ouverte en forme de cône, comme dans l'A ou l'AI mordant. Mais le phénomène est modifié dans son essence par la résonnance de la bouche. Plus cette dernière est rétrécie, soit par les lèvres, soit par la langue, et plus sa résonnance apparaît comme limitée à des sons d'une hauteur exactement déterminée ; plus elle ne renforce dans le son que les harmoniques qui avoisinent la hauteur privilégiée, plus, au contraire, elle étouffe les autres. Aussi, en étudiant le son de la voix humaine au moyen des résonnateurs, trouve-t-on assez régulièrement les six ou huit premiers harmoniques nettement perceptibles, mais présentant une intensité très-variable avec les diverses positions de la bouche ; tantôt ils éclatent énergiquement dans l'oreille, tantôt ils sont à peine perceptibles.

Les choses étant ainsi, l'étude de la résonnance dans la bouche présente une grande importance. Le moyen le plus sûr et le plus facile de trouver la hauteur à laquelle la masse d'air buccale est accordée dans les diverses positions de la bouche, lorsqu'elle est disposée de manière à produire les différentes voyelles, est le même que celui qu'on emploie pour les bouteilles de verre, et les autres cavités pleines d'air. On fait vibrer des diapasons de différentes hauteurs, et on les met devant la cavité, ici devant la bouche ouverte ; plus le son du diapason est fort dans cette position, et plus il est voisin du son propre de l'air renfermé dans la bouche. On peut modifier arbitrairement la disposition de cette dernière, mais on peut toujours trouver un diapason d'accord avec elle ; on détermine donc facilement, de cette manière, quelle position on doit donner à la bouche, pour que la masse d'air qu'elle renferme soit accordée à une hauteur déterminée.

J'avais à ma disposition une série de diapasons au moyen desquels j'ai trouvé les résultats qui vont suivre.

La hauteur des sons de plus forte résonnance de la bouche dépend seulement de la voyelle, pour l'émission de laquelle la bouche est disposée, et change d'une manière assez notable, même pour les petites modifications du timbre de la voyelle, comme en présentent les différents dialectes d'une même langue. En revanche, les sons propres de la cavité de la bouche sont presque indépendants de l'âge et du sexe. J'ai, en général, trouvé les mêmes résonnances chez des hommes, des femmes et des enfants. Ce que la bouche perd en dimensions chez ces deux dernières catégories, peut facilement être compensé par la

fermeture plus exacte de l'orifice buccal, en sorte que la résonnance peut devenir aussi grave que dans les bouches plus vastes des hommes.

Les voyelles, d'après la disposition de la bouche, se divisent en trois séries que nous pouvons inscrire dans l'ordre suivant, avec M. du Bois-Reymond père (1) :

$$A \begin{cases} \text{É} \ \dots \ \text{I} \\ \text{EU} \ \dots \ \text{U} \\ \text{O} \ \dots \ \text{OU} \end{cases}$$

La voyelle A forme le point de départ commun des trois séries. Elle correspond à une ouverture de la bouche assez ordinairement en forme d'entonnoir. Pour les voyelles de la série inférieure, O et OU, la bouche est rétrécie en avant par le moyen des lèvres (c'est dans l'OU que le rétrécissement est le plus grand), tandis que, dans la partie moyenne, la langue se retirant donne à la cavité toute la capacité possible ; la forme générale se rapproche de celle d'une bouteille sans goulot, dont l'orifice, la bouche, est assez étroit, mais dont la capacité intérieure s'étend dans toutes les directions, sans aucune séparation. Le son propre d'une semblable cavité, en forme de bouteille, est d'autant plus grave que la capacité intérieure est plus grande, et l'embouchure plus étroite. Généralement, on ne distingue nettement qu'un seul son de forte résonnance ; s'il en existe d'autres, ils sont relativement très-élevés, et ne présentent qu'une faible résonnance. Conformément à ces expériences qu'on peut faire sur des bouteilles de verre, on trouve aussi que c'est dans l'OU, correspondant au maximum de la capacité intérieure, et au minimum de l'ouverture de la bouche, que la résonnance est le plus grave ; elle correspond au fa_1. Si on change l'OU en O, la résonnance monte peu à peu, de manière à arriver au $si\flat_2$ pour un O bien pur. La disposition de la cavité buccale dans l'O est particulièrement favorable à la résonnance, l'ouverture de la bouche n'est ni trop grande ni trop petite, et la capacité intérieure suffisamment vaste. Si on fait vibrer un diapason en $si\flat_2$ devant la bouche, en disant O doucement, ou même en disposant la bouche, comme si on voulait dire O, le son du diapason deviendra très-plein et très-éclatant, de manière à pouvoir être entendu d'un auditoire tout entier. On peut faire usage pour cette expérience des diapasons en la_2 employés par les musiciens ; il faut seulement alors émettre un O un peu plus sombre pour obtenir la pleine résonnance.

Si on modifie la disposition de la bouche de manière à passer suc-

(1) *Norddeutsche Zeitschrift,* rédigé par La Motte Fouqué, 1812. — *Cadmus ou Alphabétique générale* de du Bois-Reymond, Berlin, 1862, p. 152.

cessivement de l'O à l'A, par l'intermédiaire de l'O^a et de l'A^o, la résonnance correspondante monte successivement d'une octave jusqu'au *si*$\flat_3$. Ce son correspond à l'A de l'Allemagne du Nord; pour l'A un peu plus mordant des Anglais et des Italiens, la résonnance monte au *ré*$_4$, c'est-à-dire d'une tierce encore plus haut. C'est d'ailleurs précisément pour l'A, qu'on est frappé des petites modifications dans la hauteur de la résonnance, qui font varier d'une manière considérable le son de la voyelle; aussi recommanderai-je aux linguistes, voulant définir les voyelles des différentes langues, de fixer la hauteur de la plus forte résonnance.

Dans les voyelles précédemment énumérées, je n'ai pas pu trouver un second son propre, et, par analogie avec ce qui se passe pour des cavités artificielles semblables à la bouche, il est à peine à supposer que ce second son propre existe avec une intensité appréciable. Des expériences subséquentes prouveront que la résonnance d'un seul son suffit, en réalité, à caractériser les voyelles dont il s'agit.

La seconde série de voyelles à laquelle nous arrivons contient l'A, l'AI, l'É et l'I. Les lèvres sont tirées de côté de manière à ne plus diminuer la section du courant d'air; en revanche, celui-ci se trouve de nouveau resserré entre les parties antérieures de la langue et le dôme du palais, tandis que la cavité est agrandie et s'ouvre immédiatement sur le larynx, parce que la base de la langue est contractée, ce qui fait monter le larynx. La forme de la bouche se rapproche alors de celle d'une bouteille à goulot étroit. La panse de la bouteille se trouve en arrière, dans le pharynx ou arrière-bouche; le goulot est l'étroit canal formé par la surface supérieure de la langue et le dôme du palais. Dans la série considérée des voyelles AI, É, I, ces modifications sont de plus en plus prononcées, en sorte que, pour l'I, la panse de la bouteille atteint son maximum, et le goulot son minimum. Dans l'AI, le canal tout entier est encore assez large pour qu'on puisse très-bien voir jusqu'au fond avec le laryngoscope. Pour l'emploi de ce dernier instrument, AI est la voyelle pour laquelle la disposition de la bouche est le plus favorable, parce que la base de la langue qui, dans l'A, arrête la vue, est retirée, et on peut voir au delà.

Si on emploie comme caisse de résonnance une bouteille à goulot étroit, on trouve facilement deux sons, dont l'un peut être considéré comme propre à la panse, et l'autre comme propre au goulot. Néanmoins, l'air de la panse ne peut pas vibrer tout à fait indépendamment de celui du goulot, et les deux sons propres correspondants doivent être un peu différents, et même un peu plus graves que si le goulot et la panse étaient séparés l'un de l'autre, et si on en cherchait individuellement la résonnance. Le goulot se comporte à peu près comme

un court tuyau ouvert aux deux bouts. A la vérité, son extrémité intérieure ne s'ouvre pas dans l'air libre, mais dans la concavité de la bouteille ; cependant, si le goulot est très-étroit et la panse très-large, cette dernière peut être considérée comme un espace ouvert, par rapport aux vibrations de l'air renfermé dans le goulot. Ces conditions se rencontrent surtout dans l'I ; la longueur du canal formé par la langue et le palais, mesurée depuis les dents d'en haut jusqu'au bord postérieur de l'os *palatal*, s'élève à 6 centimètres. Un tuyau ouvert de cette longueur donnerait le mi_5, tandis que l'observation donne pour la résonnance de l'I, à peu près le $ré_5$, ce qui concorde, autant que possible, avec la détermination de la hauteur d'un tuyau formé d'une manière aussi irrégulière que celui dont il s'agit.

D'après ce qu'on vient de dire, les voyelles AI, É, I présentent un son aigu et un son grave de résonnance. Les sons aigus continuent la série ascendante des sons propres des voyelles OU, O, A. Au moyen de diapasons, j'ai trouvé pour AI, un son intermédiaire entre sol_4 et la_4 ; pour É, le son si_4. Pour I, je n'avais plus de diapason convenable ; mais on peut ici s'aider du frôlement de l'air que je décrirai bientôt, et qui donne d'une manière assez exacte $ré_5$.

Les sons propres plus graves, qui résident dans la partie postérieure de la cavité de la bouche, sont un peu plus difficiles à déterminer. On peut se servir de diapasons ; cependant la résonnance est relativement faible, parce qu'elle est produite par le long et étroit goulot qui termine la cavité. Il faut remarquer, en outre, que cette résonnance ne peut se produire que si on émet la voyelle considérée doucement, à voix basse, et qu'elle disparaît si on se tait d'une manière complète, parce que, dans ce dernier cas, on modifie la forme de la cavité d'où dépend la résonnance. On doit aussi placer le diapason aussi près que possible de l'orifice de la cavité d'air placé derrière les dents d'en haut. J'ai trouvé ainsi $ré_3$ pour l'AI, et fa_2 pour l'E. Pour l'I, je ne pouvais pas observer directement avec des diapasons ; néanmoins, de la considération des harmoniques, j'ai pu conclure que cette note, à peu près aussi grave que celle de l'OU, se trouve aux environs du fa_1.

Enfin, dans la troisième série de voyelles, celle qui va de l'A à l'U, en passant par l'EU, nous avons, dans l'intérieur de la bouche, la même disposition de la langue que dans la série précédente. Pour l'U, en particulier, la disposition est à peu près la même que pour une voyelle intermédiaire entre l'E et l'I ; pour l'EU, au contraire, la même que pour une voyelle tirant un peu sur l'AI. Mais, indépendamment du rétrécissement qui se produit ici, comme dans la série précédente, entre la langue et le palais, les lèvres se rapprochent de manière à former comme un tube qui prolonge en avant le précédent. En somme,

la cavité de la bouche ressemble encore ici à une bouteille munie d'un goulot, mais plus long que pour les voyelles de la seconde série. Dans l'I, j'ai trouvé ce goulot long de 6 centimètres ; dans l'U, sa longueur, depuis l'extrémité antérieure de la lèvre supérieure jusqu'à l'origine du voile du palais, mesure 8 centimètres. La hauteur du son propre aigu qui correspond à la résonnance du goulot doit être, par conséquent, d'une quarte environ plus grave que dans l'I. D'après le calcul, ce tuyau devrait donner si_4 si ses deux extrémités étaient libres ; en réalité, il résonne pour un diapason intermédiaire entre le sol_4 et le la_4 ; nous avons trouvé de même pour l'I une différence analogue, qui s'explique facilement dans les deux cas, parce que l'extrémité postérieure des tuyaux s'ouvre dans un tuyau plus large, mais non pas à l'air libre. Quant à la résonnance de la cavité postérieure, on l'observe d'après les mêmes règles que dans la série de l'I. Elle coïncide avec celle de l'E pour l'EU, en fa_2, et avec celle de l'I pour l'U en fa_1.

Le fait que, pour les différentes voyelles, la cavité de la bouche est accordée à différentes hauteurs, a été découvert en premier lieu par Donders (1), et cela sans l'aide des diapasons, mais au moyen du frôlement que produit le courant d'air dans la bouche quand on chuchote. La cavité de la bouche se comporte comme un tuyau d'orgue, et renforce, par sa résonnance, les sons correspondants du frôlement de l'air produit soit dans la glotte rétrécie (2), soit dans les portions antérieures de la bouche également rétrécies. On n'arrive généralement pas ainsi à un son plein ; ce n'est que dans l'U et l'OU que le frôlement de l'air peut atteindre jusque-là, au moment où on commence à siffler avec la bouche. Mais, en parlant, ce serait une faute que de siffler. Cette espèce de renforcement du frôlement de l'air ressemble plutôt à ce que donnerait un tuyau d'orgue qui ne parle pas bien, soit à cause de la fausse position des lèvres, soit à cause de l'insuffisance de la force du vent. Un bruit de cette nature, cependant, quoique n'arrivant pas jusqu'à un son musical, a déjà une hauteur assez nettement déterminée pour être perçu par une oreille exercée. Seulement, comme dans tous les cas analogues où il faut comparer des sons de timbre très-différent, on se trompe très-facilement sur l'octave. On a déterminé, au moyen de la réson-

(1) *Archiv für die Holländischen Beiträge für Natur-und Heilkunde*, von Donders, et Berlin, Bd. I, S. 157. On trouve des remarques plus anciennes, mais incomplètes, dans S. Reyer, *Mathesis mosaica*, Kiel, 1619. — Chr. Helwag, *de Formatione loquelæ Dissertatio*. Tubingæ, 1780. — Florke, *Neue Berliner Monatsschrift*, Sept. 1803, Febr. 1804. — Olivier, *Ortho-epo-graphisches Werk*, 1804.

(2) C'est la partie postérieure de la glotte, entre les cartilages thyroïdes, qui, dans le chuchotement, reste ouverte en forme d'orifice triangulaire et laisse passer l'air, tandis que les cordes vocales sont placées l'une sur l'autre.

nance des diapasons, quelques-unes des hauteurs auxquelles on arrive ; d'autres, comme l'U et l'EU, par le son qu'on obtiendrait dans un tuyau de forme régulière ; les autres sont faciles à déterminer quand on les range avec les premières dans un ordre mélodique. On obtient l'ordre suivant :

A mordant,	AI,	É,	I
$ré_3$,	sol_3,	si_3,	$ré_4$,

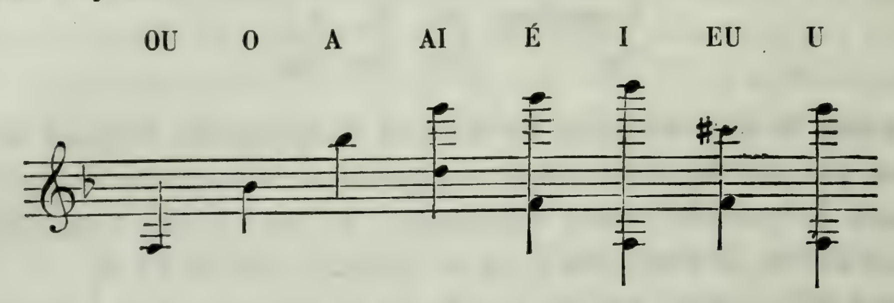
c'est-à-dire le renversement de sixte et de quarte de l'accord de *sol* mineur, qui peut facilement être comparé avec les sons correspondants du piano. Je pouvais encore déterminer, au moyen des diapasons, la position de l'A, de l'AI, de l'E, et en conclure celle de l'I (1).

Pour l'OU, il n'est pas du tout facile de déterminer la hauteur de résonnance au moyen des diapasons ; cette résonnance est assez faible à cause du peu d'ouverture de la bouche. Ici, j'ai été guidé par un autre phénomène. Quand on monte la gamme depuis l'ut_1, en chantant sur la voyelle OU, on sent que la trépidation de l'air dans la bouche, et même sur le tympan des deux oreilles, où elle produit un chatouillement, atteint son maximum lorsqu'on arrive au fa_1, pourvu qu'on s'efforce d'émettre un OU naturel, sombre, sans le laisser se changer en O. Dès qu'on dépasse le fa_1, le timbre se modifie, la forte trépidation dans la bouche, le chatouillement dans les oreilles cessent. Pour le fa_1, les choses se passent exactement de même que, si on associait une anche à une caisse résonnante sphérique, accordée à une hauteur voisine de celle de l'anche. On obtient également, dans ce dernier cas, un ébranlement de l'air d'une énergie peu commune dans la sphère, et, lorsqu'on s'élève progressivement d'un son plus grave à un son plus aigu que l'anche, au moment où on arrive au son propre de cette dernière, un changement brusque se produit dans le timbre.

(1) Les solutions de Donders diffèrent un peu des miennes, soit qu'elles se rapportent à la prononciation hollandaise, et les miennes à celle du nord de l'Allemagne, soit que Donders, ne s'aidant pas des diapasons, ne pût déterminer d'une manière certaine les octaves auxquelles appartenaient les bruits. La table suivante donne ces différences :

	HAUTEUR	
VOYELLES.	D'APRÈS DONDERS.	D'APRÈS HELMHOLTZ.
OU	fa_2	fa_1
O	$ré_2$	$si\flat_2$
A	$si\flat_2$	$si\flat_3$
EU	*sol ?*	$ut\sharp_4$
U	la_3	sol_4 — $la\flat_4$
E	$ut\sharp_4$	$si\flat_4$
I	fa_4	$ré_5$

Par ce moyen on trouve que la résonnance de la bouche, pour l'OU, est un fa_2, encore plus facilement et plus sûrement qu'avec le secours des diapasons. Par conséquent, nous pouvons représenter par les notes suivantes les résonnances de la bouche correspondant aux diverses voyelles :



L'influence que ces résonnances exercent sur le timbre de la voix, est exactement la même que celle que nous avons déjà appris à reconnaître dans les instruments à anche artificielle. Elles renforcent tous ceux des harmoniques qui coïncident avec l'un des sons propres de la cavité buccale, ou qui en sont tout au moins assez voisins, tandis qu'elles étouffent plus ou moins les autres. L'extinction des sons non renforcés est d'autant plus frappante que la cavité de la bouche est plus resserrée, soit entre les lèvres comme dans l'OU, soit entre la langue et le palais comme dans l'I et l'U.

Ces différences entre les harmoniques des différentes voyelles peuvent être très-facilement et très-nettement appréciées au moyen des résonnateurs, au moins toutes les fois qu'il s'agit des sons de l'octave d'indice 2 ou 3. Prenons, par exemple, un résonnateur accordé en $si\flat_2$, et faisons chanter les voyelles, avec la même force, sur l'un des sous-harmoniques du $si\flat_2$, sur le $si\flat_1$, le $mi\flat_1$, le $si\flat_0$, le $sol\flat_0$, le $mi\flat_0$, selon la série, par une voix de basse exercée à bien tenir le son à sa hauteur, et à bien prononcer les voyelles. Nous trouverons que, pour un O bien pur et bien plein, le $si\flat_2$ du résonnateur éclatera énergiquement dans l'oreille. Le même harmonique se produira encore avec beaucoup de force pour un AI mordant, et pour une voyelle intermédiaire entre l'A et l'EU, plus faiblement pour l'A, l'É, l'EU, et, aussi faiblement que possible, dans l'OU et l'I. On trouve aussi facilement, que la résonnance de l'O s'affaiblit sensiblement, soit qu'on l'émette plus sourd, se rapprochant de l'OU, soit qu'on l'ouvre davantage, le rapprochant de l'EU. Si on prend au contraire le résonnateur accordé une octave plus haut en $si\flat_3$, c'est la voyelle A qui fait maintenant vibrer le résonnateur avec le plus de force, tandis que l'O n'exerce plus ici qu'une faible action.

Pour les harmoniques aigus de l'AI, l'É, l'I, on ne peut plus faire de résonnateurs capables de les renforcer d'une manière notable. Ici il

a fallu généralement avoir recours à l'observation au moyen de l'oreille seule. Aussi ai-je eu beaucoup de peine à découvrir ces sons prépondérants dans la voix, et, au moment de mes dernières publications, je ne connaissais pas encore ces harmoniques aigus (1).

Pour cette observation il vaut mieux faire chanter dans le haut des voix de femme, ou des voix d'homme en fausset. Les harmoniques des notes aiguës ne sont pas aussi voisins les uns des autres, dans la région considérée de la gamme, que ceux des notes graves; aussi est-il plus facile de les distinguer. Sur le $si\flat_2$, par exemple, les femmes peuvent donner encore facilement toutes les voyelles à pleine voix; plus haut, le choix est plus restreint. On entend alors nettement la douzième fa_4 pour un A ouvert, la double octave $si\flat_4$ pour l'É, et la tierce aiguë $ré_5$ pour l'I; cette dernière note est même souvent très-perçante.

En faisant ces expériences il faut avoir égard à ce fait que certaines voyelles se prononcent beaucoup mieux que d'autres dans certaines régions de la gamme (2). D'après mes propres observations, d'ailleurs peu étendues sous ce rapport, les voyelles qui conviennent le mieux, sont d'abord celles dont le son caractéristique est un peu plus haut que la note chantée, puis celles dont le son caractéristique est le deuxième ou le troisième son partiel de la note chantée. Je trouve que, chez les hommes, l'OU dont le son caractéristique est fa_1, convient le mieux pour le $ré_1$, le mi_1, le fa_1, puis pour le fa_0, d'une octave au-dessous. L'É, dont la note caractéristique est fa_1, convient d'abord aux sons aigus de la basse $ré_2$, mi_2 et fa_2, puis aux sous-harmoniques du fa_2, surtout au fa_1 et au $si\flat_0$. Aux limites de ma voix de tête, je ne peux chanter sur le $si\flat_1$ que l'O, l'AI ou l'A°, dont le $si\flat_1$ est le son caractéristique. C'est précisément pour les notes qu'il est difficile d'atteindre, placées aux limites de la voix, que l'influence des voyelles est le plus frappante. Au-dessous de l'ut_2, les voix de femme ont toutes une tendance à chanter sur un O sourd ou un O^{ou}, dont les sons propres sont à cette hauteur. Dans leurs notes aiguës, au-dessus du mi_3 ou du fa_3, c'est l'A dont le son caractéristique est $si\flat_3$ qui est le meilleur; au-dessus du si_3, c'est l'I dont le son propre est d'une octave plus haut, et qui est plus éclatant que l'AI placé à la même hauteur.

Si, dans l'observation des harmoniques, on choisit pour chanter une note, sur laquelle certaines voyelles sortent particulièrement fort, on entend aussi les harmoniques de cette note avec une intensité re-

(1) *Gelehrte Anzeigen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, 18 juin 1859.

(2) Ces différences évidemment si importantes pour le chant ont été étudiées à fond par E. Seiler, *Altes und Neues über die Ausbildung des Gesangorgans*, Leipzig, 1861, p. 52.

lativement trop forte. Dans les voix d'homme graves, cela a peu d'influence, parce que, dans le grave, l'OU et l'I seuls ont leurs résonnances, et que ces voix occupent la région moyenne de la gamme, la plus commode, celle où on peut émettre facilement les différentes voyelles avec la même force. En revanche, cette influence est beaucoup plus grande dans les voix de femme. En particulier, les notes aiguës qui tombent dans la région de résonnance de la voyelle A, sortent tellement mieux sur l'A que sur toute autre voyelle, que les harmoniques de cet A, dans la moitié supérieure de l'octave d'indice 4, présentent une énergie très-supérieure à celle des sons caractéristiques de l'É et de l'I, situés dans le voisinage de ces notes. On doit donc toujours choisir, parmi les sous-harmoniques du résonnateur, la note sur laquelle le chanteur peut donner facilement, avec la même force, les voyelles qu'il s'agit de comparer, ou l'inviter à modérer le son le plus facile de manière à le rendre égal aux autres. Au reste, par les observations au moyen des résonnateurs, comme par celles au moyen des diapasons, j'ai trouvé chez plusieurs voix de femmes, la même hauteur de résonnance que pour les voix d'hommes; seulement les résonnances trop graves de l'OU et de l'I ne peuvent y apparaître.

Je dois encore mentionner ici une circonstance particulière, qui distingue la voix humaine des autres instruments de musique, et révèle un rapport particulier avec l'oreille humaine. Au-dessus des résonnances aiguës de l'I, dans la région qui va du mi_5 au sol_5, les sons du piano ont un timbre particulièrement mordant, et on serait facilement porté à croire que les marteaux sont trop durs, ou que le mécanisme n'est pas le même que pour les sons voisins. Cependant les choses sont les mêmes pour toute l'étendue du piano, et si on met à l'oreille un tout petit tube, ou une toute petite sphère en verre, les sons mordants de tout à l'heure deviennent doux et faibles comme les autres, tandis qu'une autre série de sons plus graves sortent maintenant plus forts et plus mordants. Il suit de là, que l'oreille humaine elle-même favorise, par sa résonnance, les sons placés entre le mi_5 et le sol_5, et est elle-même accordée pour l'un d'eux. Ces sons affectent douloureusement une oreille sensible. Par conséquent, les harmoniques, dans cette région, sortiront avec une intensité particulière, et produiront sur l'oreille une impression très-forte. C'est ce qui arrive en général dans la voix humaine, quand elle est émise avec effort, de manière à prendre un caractère éclatant. Dans les puissantes voix d'hommes chantant fort, on entend ces harmoniques résonner en même temps comme une sorte de bruissement; mais c'est surtout frappant dans les chœurs, quand les voix crient un peu. Chaque voix

d'homme, à cette hauteur, présente déjà des harmoniques dissonants. Quand les basses donnent leur mi_2 aigu, le septième son partiel est le $ré_5$, le huitième est le mi_5, le neuvième le $fa\sharp_5$, le dixième le $sol\sharp_5$. Si on entend simultanément le mi_5 et le $fa\sharp_5$ résonner avec force, le $ré_5$ et le $sol\sharp_5$ étant plus faibles, il y a naturellement une aigre dissonnance. Quand beaucoup de voix chantent ensemble, donnant les sons dont il s'agit avec de petites différences de hauteurs, il se produit un bruissement d'une nature particulière, qu'on distingue très-facilement lorsque l'attention a été une fois appelée là-dessus. Je n'ai pu apprécier de différence dans les voyelles, mais le bruissement cesse quand les voix chantent *piano*, quoique, même dans ce cas, l'intensité totale du son pour un chœur soit encore assez notable. Cette nature de bruissement est une particularité de la voix humaine, que les instruments d'orchestre ne présentent pas de la même manière, avec le même degré de netteté et d'intensité. Sur aucun instrument, je n'ai entendu cet effet aussi nettement que dans la voix humaine.

On entend aussi les mêmes harmoniques dans les voix de *soprano* chantant fort; dans les voix aigres et peu sûres, ils produisent un tremblement, ce qui donne quelque analogie avec le bruissement formé dans les voix d'homme. Mais, dans des voix de femme bien sûres et harmonieuses, ainsi que dans de bonnes voix de ténor, j'ai pu entendre ces harmoniques très-purs et résonnant avec calme. Dans la marche mélodique de la partie chantante, j'entends ces sons aigus de l'octave d'indice 5, tantôt plus bas, tantôt plus haut, dans l'étendue d'une tierce mineure, à mesure que les divers harmoniques de la note chantée arrivent dans la région pour laquelle notre oreille est si sensible. Mais il est surprenant que la voix humaine soit si abondamment pourvue des harmoniques pour lesquels l'oreille humaine est si sensible. Au reste, Mme E. Seiler a remarqué aussi que les chiens sont très-sensibles au *mi* aigu du violon.

Ce renforcement des sons situés au milieu de l'octave d'indice 5 n'a d'ailleurs rien à voir avec la caractéristique des voyelles. Si j'en ai parlé ici, c'était seulement parce qu'il est facile de distinguer les sons dont il s'agit dans les recherches sur le timbre des voyelles, et on ne doit pas se laisser aller à croire qu'il faut y chercher un caractère particulier à certaines voyelles. Ils caractérisent seulement la voix émise avec force.

A l'OU, il faut joindre encore le grognement qui prend naissance lorsqu'on chante la bouche fermée. Ce son de grognement se donne sur les consonnes M, N et GN. Les fosses nasales, qui servent ici à laisser passer le courant d'air, présentent, sous le rapport des dimensions, un orifice encore plus étroit que la cavité de la bouche dans

l'OU. Un son grogné présente par conséquent, à un degré encore plus élevé, les propriétés de l'OU. Mais, quoiqu'il y ait ici des harmoniques, se prolongeant même assez haut, leur intensité diminue avec leur hauteur, encore beaucoup plus rapidement que dans l'OU. L'octave du son fondamental a encore une certaine intensité ; tous les autre harmoniques sont faibles. Dans le grognement sur l'M et sur l'N, le timbre varie encore un peu, parce que sur l'N, les harmoniques sont un peu moins étouffés que sur l'M. Mais ces consonnes ne se distinguent nettement qu'au moment où l'on ouvre ou qu'on ferme la bouche. Quant à la composition du son dans les autres consonnes, nous ne pouvons pas l'étudier plus à fond, parce que ce sont des bruits d'une hauteur variable, n'ayant aucun rapport avec les sons musicaux ; et c'est à l'étude de ces derniers que nous devons nous borner ici.

La théorie des voyelles que je viens d'exposer ici, est confirmée par des expériences faites au moyen d'instruments à anche artificiels, munis de caisses résonnantes appropriées. C'est ce que fit en premier lieu Willis, qui associait des tuyaux à anche à des tubes résonnants de longueur variable, et produisait différents sons par l'allongement du tube résonnant. Les tubes les plus courts lui donnaient l'I, puis l'É, l'A, l'O, et enfin l'OU, correspondant au tube d'un quart de longueur d'onde. Pour une plus grande longueur, les voyelles se représentaient dans l'ordre inverse.

Les déterminations ainsi opérées de la hauteur des tuyaux résonnants concordent bien avec les miennes pour les voyelles graves. Pour les voyelles aiguës, Willis a trouvé des sons relativement trop élevés, parce que les longueurs d'onde deviennent plus petites que le diamètre des tubes, et que, par conséquent, le calcul ordinaire de la hauteur, d'après la longueur du tuyau, n'est plus applicable. De plus, les voyelles É et I, artificiellement produites, différaient assez des voyelles naturelles, à cause de l'absence de la seconde résonnance, et par conséquent, comme le reconnaît Willis lui-même, ne se distinguaient pas bien l'une de l'autre.

VOYELLES.	DANS LES MOTS ANGLAIS.	HAUTEUR	
		D'APRÈS WILLIS.	D'APRÈS HELMHOLTZ.
O	No	ut_3	ut_3
AO	Nought	$mi\flat_3$	$mi\flat_3$
	Paw	sol_3	sol_3
A	Part	$mi\flat_4$	$mi\flat_4$
	Paa	fa_4	
E	Pay	$ré_5$	$si\flat_4$
	Pet	ut_6	ut_5
I	See	sol_6	$ré_5$

On obtient les voyelles encore mieux et plus nettement, en employant des sphères creuses accordées, au lieu de tubes cylindriques. En associant un instrument à anche qui donnait le $si\flat_1$, à une sphère de verre en $si\flat_1$, j'ai obtenu la voyelle OU ; avec la sphère $si\flat_2$, l'O ; avec la sphère $si\flat_3$, l'A un peu fermé ; avec la sphère en $ré_4$, un A aigre. Avec des caisses résonnantes accordées dans les mêmes tons, nous obtenons donc les mêmes voyelles ; la forme et la nature de la paroi n'exercent aucune influence. Il m'est arrivé également d'obtenir avec les mêmes tuyaux à anche plusieurs variétés d'AI, EU, É, I, en y adaptant des sphères creuses de verre, dans l'orifice desquelles était encore ajouté un tube long de 6 à 10 centimètres, de manière à obtenir la double résonnance donnée par la bouche dans ces voyelles.

Willis a encore donné une autre méthode intéressante pour produire les voyelles. Si on fait tourner rapidement une roue dentée, munie d'un grand nombre de dents, contre le pourtour de laquelle vient butter un ressort élastique en fer, celui-ci est soulevé par chacune des dents, et on obtient un son dont les vibrations sont en nombre égal au nombre des dents. Mais le ressort lui-même, quand il est bien fixé à une de ses extrémités, et qu'il entre en vibrations, donne un son d'autant plus aigu que le ressort est plus court. En faisant varier la longueur du ressort pour une même vitesse de la roue dentée, on obtient, avec un ressort long, un son analogue à l'OU, avec un ressort de plus en plus court O, A, É, I, le son propre du ressort jouant ici le rôle du son renforcé dans la voyelle. A la vérité, l'imitation est beaucoup plus imparfaite qu'au moyen des tuyaux à anche. Mais cette expérience signifie évidemment que, dans les sons produits, certains harmoniques, ceux correspondant au son propre du ressort vibrant, sont renforcés.

Willis lui-même a donné, sur la nature des voyelles, une théorie différente de celle que nous avons exposée ici, comme se rattachant aux autres phénomènes acoustiques. Il suppose que les secousses de l'air qui produisent le son de la voyelle, sont elles-mêmes des sons qui se perdent rapidement, et correspondent au son propre du ressort dans sa dernière expérience, ou à la faible résonnance que produit une secousse ou une petite explosion de l'air, dans la cavité de la bouche, agissant comme caisse résonnante d'un tuyau à anche. En réalité, on entend quelque chose d'analogue au son des voyelles, lorsqu'on fait battre une petite verge, contre les dents, tout en donnant à la bouche la forme qu'elle affecte pour les différentes voyelles. La description du mouvement sonore, donnée par Willis, concorde assez bien avec la réalité, mais elle ne donne que l'espèce et la nature du mouvement de l'air ; elle ne dit rien de la réaction particulière à l'oreille en présence de ce mouvement. L'oreille le décompose en une série d'harmoniques selon les lois de la vibration par influence ; c'est ce que montre l'analyse du son de la voyelle, soit par l'oreille seule, soit avec le secours des résonnateurs.

C'est ce qui apparaîtra encore plus nettement dans le prochain chapitre, à l'occasion de la description des expériences où l'on forme directement les voyelles au moyen de leurs harmoniques.

Les voyelles se distinguent donc essentiellement des sons de la plupart des autres instruments de musique, en ce que l'intensité des harmoniques qu'elles présentent, ne dépend pas du numéro d'ordre, mais de la hauteur absolue. Si, par exemple, je chante la voyelle A sur la note *mi* $\flat_0$, le son renforcé, le *si* $\flat_3$, est le onzième harmonique ; quand je donne la même voyelle sur le *si* $\flat_2$, c'est le second son partiel qui est renforcé.

Nous pouvons tirer des exemples qui précèdent, les règles générales qui vont suivre, sur les relations qui unissent le timbre à la composition du son :

1° Des sons simples, comme ceux des diapasons associés à des tuyaux résonnants, ceux des grands tuyaux bouchés de l'orgue, présentent beaucoup de douceur, de charme, n'ont aucune dureté, mais ils manquent d'énergie, et sont sourds dans les régions graves.

2° Les sons accompagnés d'une série d'harmoniques graves de moyenne intensité, jusqu'au sixième environ, sont pleins et d'un bon emploi en musique. Comparés aux sons simples, ils ont quelque chose de plus riche, de plus fourni, et sont cependant parfaitement harmonieux et doux, tant que les harmoniques supérieurs font défaut. A

cette catégorie appartiennent les sons du piano, des tuyaux ouverts de l'orgue, les sons faibles et doux de la voix humaine et du cor; ces derniers formant la transition du côté des sons munis d'harmoniques élevés, tandis que les flûtes et les jeux de flûte, avec peu de vent, se rapprochent des sons simples.

3° Quand les sons partiels impairs existent seuls, comme dans les petits tuyaux bouchés de l'orgue, les cordes du piano pincées au milieu et la clarinette, le son prend un caractère creux et même nasillard, pour un grand nombre d'harmoniques.

4° Si le son fondamental domine, le timbre est plein ; il est vide, au contraire, si l'intensité du son fondamental ne l'emporte pas suffisamment sur celle des harmoniques. Ainsi le son des grands tuyaux ouverts de l'orgue est plus plein que celui des petits tuyaux de même nature; le son des cordes est plus plein, lorsqu'elles sont ébranlées par les marteaux du piano, que lorsqu'elles sont frappées avec un morceau de bois ou pincées par les doigts; le son des tuyaux à anche associés à des appareils résonnants appropriés, est plus plein que celui des mêmes tuyaux sans caisses résonnantes.

5° Quand les harmoniques supérieurs, à partir du sixième ou du septième, sont très-nets, le son devient aigre et dur. Nous en trouverons plus tard l'explication, dans les dissonnances que forment entre eux ces harmoniques supérieurs. Le degré de mordant peut varier; avec une faible intensité, les harmoniques supérieurs ne diminuent pas essentiellement la possibilité de l'emploi musical du son; ils augmentent, au contraire, le caractère et la puissance d'expression de la musique. Dans cette catégorie figurent, avec une importance particulière, les sons des instruments à archet, puis, la plupart des instruments à anche, le hautbois, le basson, l'harmonium, la voix humaine. Les sons durs et éclatants des instruments de cuivre sont extraordinairement pénétrants, et, par suite, donnent l'impression d'une grande puissance, à un plus haut degré que les sons de même hauteur, mais d'un timbre doux. Aussi conviennent-ils peu, par eux-mêmes, à la musique de chambre, mais ils sont d'un grand effet à l'orchestre. On verra plus tard de quelle manière les harmoniques supérieurs peuvent rendre le son plus pénétrant.

CHAPITRE VI

DE LA PERCEPTION DU TIMBRE.

Jusqu'ici nous n'avons cherché à analyser des timbres donnés, qu'en recherchant les différences qu'ils présentent, sous le rapport du nombre et de l'intensité des harmoniques. Avant de déterminer avec plus de précision le rôle de l'oreille dans la perception du timbre, il est nécessaire de rechercher si, pour qu'un timbre musical donné soit perceptible, il suffit que les harmoniques présentent une certaine intensité, ou bien, si, indépendamment de ces derniers, d'autres différences peuvent encore exister et être perçues dans le timbre. Comme nous ne nous occupons en premier lieu que des sons *musicaux*, c'est-à-dire de ceux provenant d'un mouvement de l'air exactement périodique, et que nous excluons, comme bruits, tous les mouvements aériens irréguliers, la question peut se restreindre encore davantage. Si nous imaginons le mouvement de l'air producteur d'un son donné, divisé en une somme de vibrations pendulaires, ce n'est pas seulement l'intensité de toutes ces vibrations qui fait varier la forme du mouvement résultant, mais aussi leurs positions relatives, ou d'après l'expression des physiciens, *leur différence de phase*. Composons, par exemple, les deux vibrations simples A et B (*fig.* 31), de manière que le point e de la courbe soit placé en B, au-dessus du point d_0 ou du point d_1, de la courbe A, nous obtenons les deux formes C et D, tout à fait différentes l'une de l'autre. En plaçant le point de départ e en d_2 ou d_3, nous obtenons encore d'autres formes, qui sont le renversement des courbes C et D, comme on l'a déjà expliqué plus haut, page 52. Si le timbre ne dépend que de l'intensité des harmoniques, les mouvements C, D, etc., doivent tous produire la même impression sur l'oreille. S'il dépend, au contraire, de la position respective des deux ondes, ou de leur différence de phase, les impressions sur l'oreille seront différentes.

Pour décider la question dans un sens ou dans l'autre, il était nécessaire de composer des sons artificiellement au moyen de sons simples, et de voir, si la modification de la différence de phase a, comme conséquence, des modifications dans le timbre, les harmoniques con-

servant la même intensité. Pour obtenir des sons simples d'une grande pureté, dont on puisse régler avec précision l'intensité et la différence de phase, ce qu'il y a de mieux, ce sont des diapasons dont le son, ren-

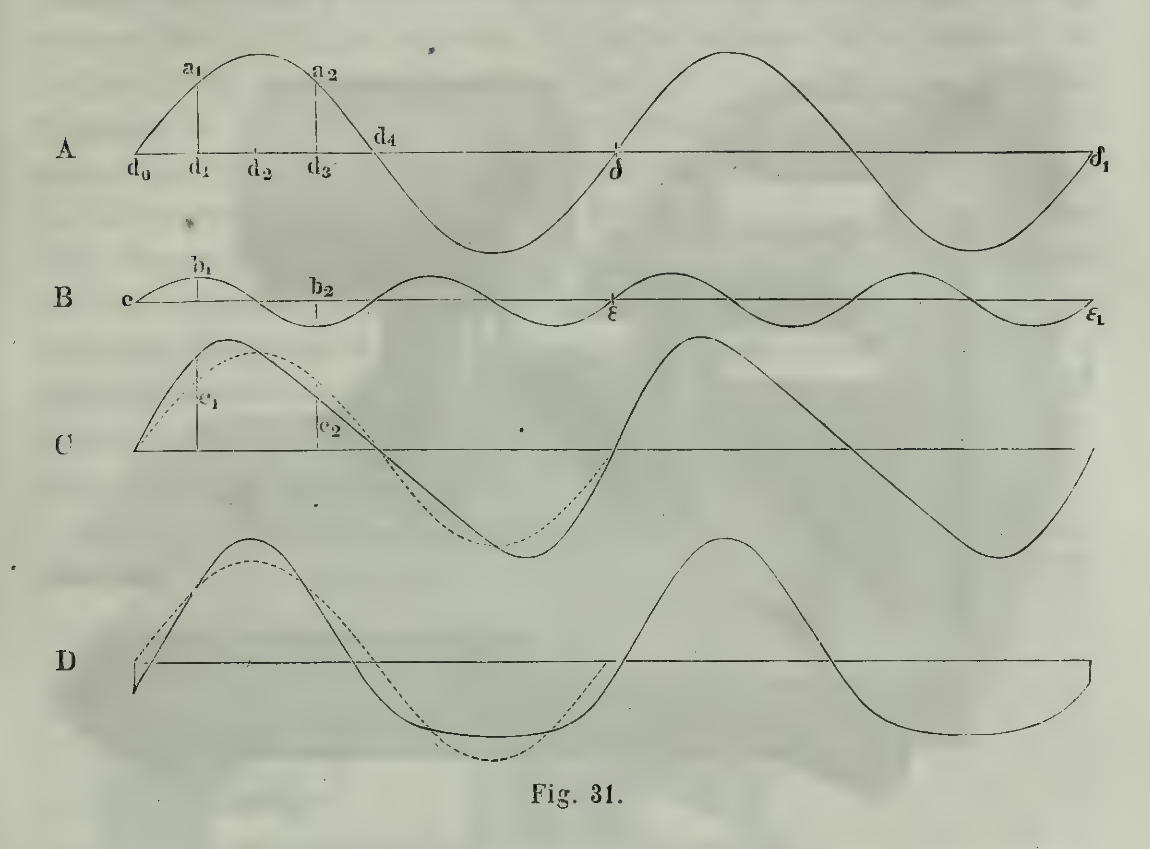


Fig. 31.

forcé par un tuyau de résonnance comme précédemment, se communique à la masse d'air. Pour imprimer aux diapasons un mouvement très-régulier et durable, on les plaçait entre les branches d'un petit électro-aimant, comme le représente la figure 32. Chaque diapason *a* était vissé dans une planchette distincte *dd*, laquelle reposait sur des morceaux visqueux de tubes en gomme, de manière à empêcher les vibrations du diapason de se communiquer à la table, et de devenir ainsi perceptibles. Les branches de l'électro-aimant, entourées de fil de laiton, sont représentées par *bb*, et *f* désigne les pôles tournés vers le diapason. Sur la planchette horizontale *dd*, se trouvent deux vis de pression *g* qui communiquent avec le circuit de l'électro-aimant, et servent à recevoir d'autres fils par lesquels peuvent passer les courants électriques. Pour faire rapidement vibrer le diapason, ces courants doivent présenter une intensité périodiquement variable. Un appareil particulier sert à les produire ; il sera décrit plus bas.

Lorsqu'au moyen de cette disposition, les diapasons entrent en vibrations, on entend extraordinairement peu de leur son, parce qu'ils ne peuvent communiquer leurs vibrations que dans une très-faible proportion à l'air ambiant, ou aux corps solides qui les entourent. Si on veut entendre le son résonner avec force, il faut approcher du diapason

le tuyau résonnant *i*, accordé au même ton. Ce tuyau est fixé sur une planchette *k* qui peut glisser dans une rainure de la planche *dd*, de manière à permettre d'approcher l'orifice du tuyau, aussi près que

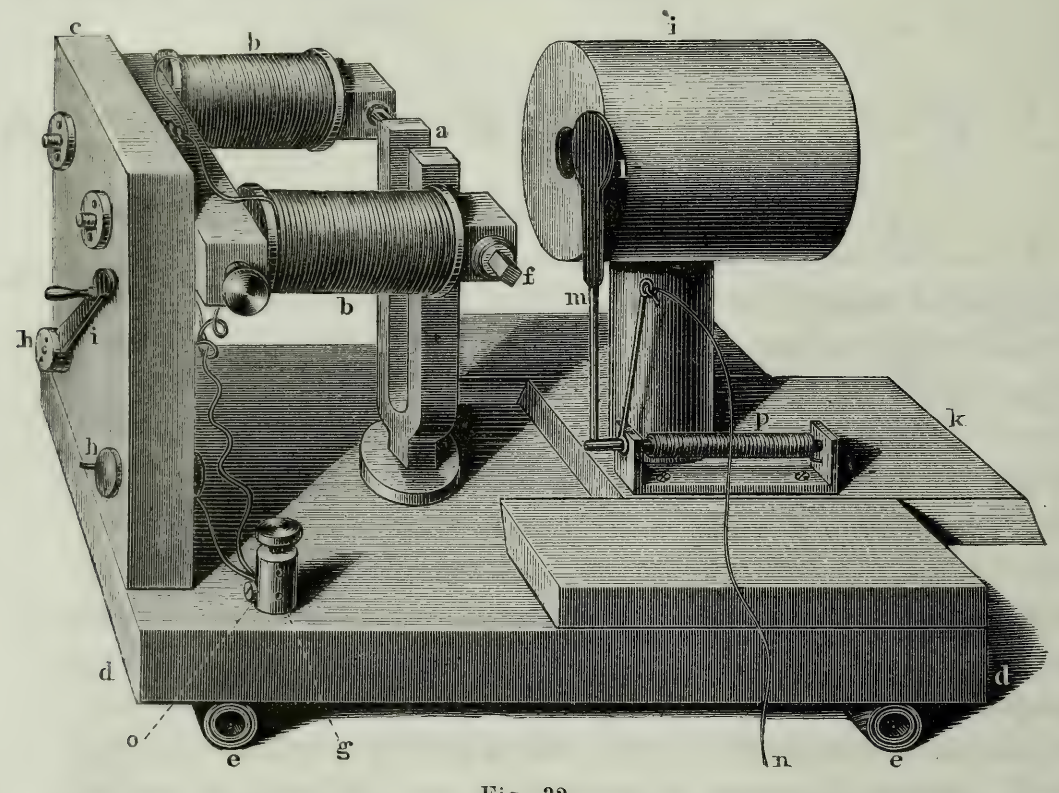


Fig. 32.

possible du diapason. Dans le dessin, le tuyau est représenté loin du diapason, pour montrer nettement toutes les parties de l'appareil ; dans les expériences, on doit l'en rapprocher autant que possible. L'orifice du tuyau résonnant est fermé par un petit couvercle *l*, supporté par un levier *m*. En tirant le fil *n*, on ouvre cet orifice, et le son du diapason se communique à l'air avec force. Si on lâche le fil *n*, le couvercle se replace devant l'orifice par l'action du ressort *p*, et le son devient inappréciable. En n'ouvrant que partiellement l'orifice du tuyau, on peut donner au son une intensité aussi faible que l'on veut. Tous les fils qui ouvrent les tuyaux de résonnance des divers diapasons sont d'ailleurs rattachés aux touches d'un petit clavier; en abaissant une touche, on ouvre le tuyau résonnant correspondant.

J'avais d'abord relié ainsi huit diapasons correspondant au $si\flat_0$ et à ses sept premiers harmoniques ($si\flat_1$, *fa*, $si\flat_2$, $ré_3$, fa_3, la_3 et $si\flat_3$). Chaque son fondamental correspond à peu près à la région où parlent ordinairement les voix de basse ; plus tard j'ai fait faire encore des diapasons pour le $ré_4$, le fa_4, le $la\flat_4$ et le $si\flat_4$, et j'ai pris le $si\flat_1$ comme son fondamental.

Pour mettre les diapasons en mouvement, on emploie des courants

électriques intermittents qu'on fait passer à travers le circuit de l'électro-aimant ; le nombre des passages des courants électriques doit être exactement égal au nombre de vibrations du diapason le plus grave *si* $\flat_0$, c'est-à-dire de 120 à la seconde. A chaque passage, le fer doux de l'électro-aimant devient magnétique pendant un instant, et attire les branches du diapason, qui sont elles-mêmes aimantées une fois pour toutes. Les branches du diapason le plus grave, *si* $\flat_0$, sont attirées une fois à chaque vibration par les pôles de l'électro-aimant, celles du second diapason *si* $\flat_0$, qui fait deux fois plus de vibrations, sont attirées une fois toutes les deux vibrations, etc., et, par conséquent, les vibrations des diapasons sont provoquées et entretenues tant qu'on fait passer le courant dans l'appareil. Aussi les vibrations des diapasons graves sont-elles très-énergiques, et celles des diapasons aigus relativement faibles.

Pour produire ainsi des courants intermittents d'une périodicité exactement déterminée, on se sert de l'appareil représenté figure 33.

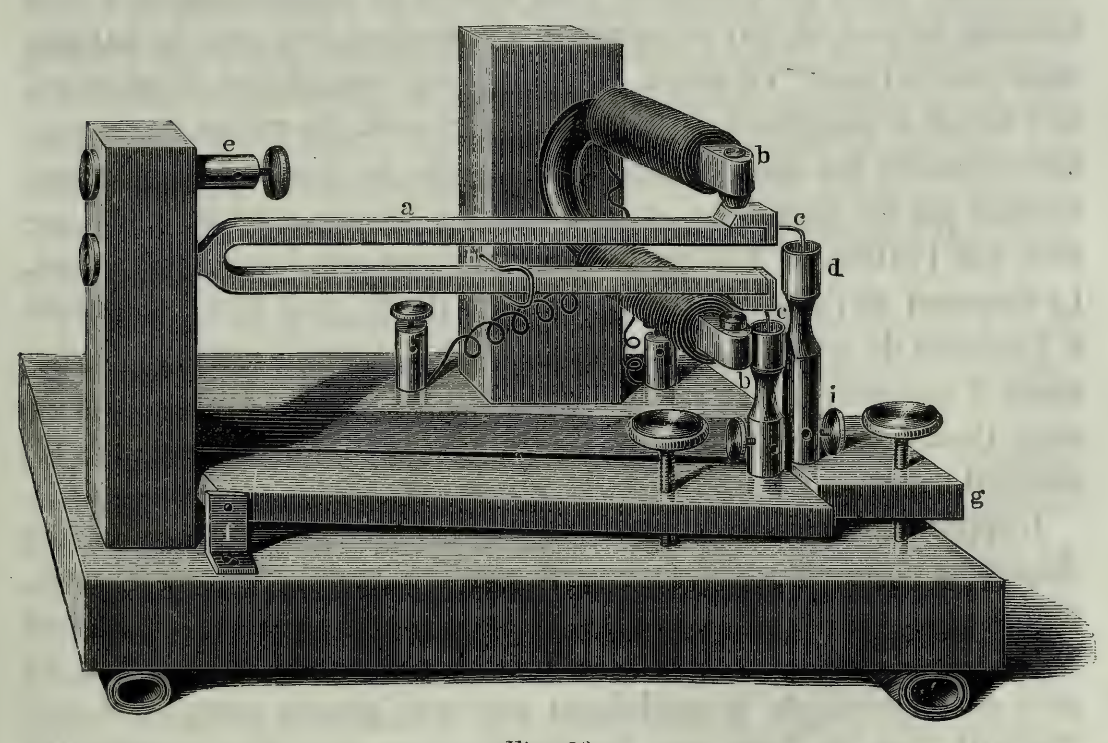


Fig. 33.

Un diapason *a* est fixé horizontalement entre les branches d'un électro-aimant *bb* ; ses extrémités portent deux fils de platine *c*, *c*, qui plongent dans deux godets remplis moitié de mercure, moitié d'alcool, et formant les extrémités supérieures de deux tiges de laiton. Ces dernières ont des vis de pression *i*, pour recevoir les électrodes, et reposent sur deux planchettes *f*, *g*, qui peuvent tourner autour d'un axe *f*, et qui chacune peuvent être élevées ou abaissées un peu au moyen des

vis *g* ; on peut ainsi les placer de manière que les extrémités des fils de platine *c*, *c* soient en contact avec le mercure dans les godets *d*, au-dessous de l'alcool. Une troisième vis de pression *e* est reliée à la poignée du diapason. Quand celui-ci entre en vibrations et est traversé par un courant électrique allant de *i* à *e*, le circuit est interrompu toutes les fois que l'extrémité du diapason quitte le mercure, et rétabli toutes les fois que le fil de platine revient au contact avec le mercure. Si le courant ainsi interrompu traverse en même temps l'électro-aimant (*fig.* 33),ce dernier, qui s'aimante à chaque passage du courant, fait vibrer le diapason *a*, aimanté lui-même. Généralement, un seul des godets *d* sert au passage du courant. On verse de l'alcool sur le mercure pour éviter que celui-ci ne soit oxydé par les étincelles qui se produisent au moment de l'interruption du courant. Ce système d'interruption a été imaginé par Neef; au lieu d'un diapason, il faisait usage d'un ressort métallique vibrant, et cette disposition se retrouve le plus généralement dans les appareils d'induction, très-employés en médecine. Mais les vibrations d'un ressort se communiquent à tous les corps voisins, et, par conséquent, s'entendent trop pour le but que nous poursuivons ; en outre, elles sont trop irrégulières. C'est ce qui m'a décidé à substituer un diapason au ressort. En raison de la parfaite symétrie des deux branches, le manche du diapason est très-peu ébranlé par les vibrations, et, par suite, n'ébranle pas lui-même, autant que l'extrémité fixe du ressort, les corps sur lesquels il repose. Le diapason de l'appareil qui vient d'être décrit, doit être exactement à l'unisson de celui du son fondamental $si\flat_0$; pour y arriver, j'ai fait usage d'une petite pince en fort acier, qui se place sur l'une des branches. Quand on la rapproche de l'extrémité libre de la branche, le son descend ; dans le cas contraire, le son monte (1).

L'appareil tout entier marche-t-il, les résonnateurs fermés : tous les diapasons prennent un mouvement régulier, mais on n'entend rien, tout au plus une faible somme de sons, produits par l'action directe des diapasons sur l'air. Si on ouvre un ou plusieurs résonnateurs, les sons correspondants se produisent avec une grande énergie, et avec d'autant plus de force que les résonnateurs sont plus ouverts. On peut ainsi former rapidement diverses combinaisons du son fondamental avec les harmoniques présentant des intensités variables, et produire de cette manière des sons de divers timbres.

Parmi les sons fournis par la nature qui paraissent le mieux se prêter à être reproduits par les diapasons, viennent en premier lieu

(1) L'appareil a été construit par Fessel de Cologne ; on donnera dans le supplément VII une description plus détaillée et des indications plus précises pour les expériences.

les voyelles de la voix humaine, parce qu'elles contiennent relativement peu de bruits étrangers, et présentent, dans leur timbre, des différences très-tranchées qu'il est facile de reproduire. La plupart des voyelles, en effet, sont caractérisées par un petit nombre d'harmoniques graves que peuvent donner nos diapasons ; l'É et l,I seulement, sortent un peu des limites. Le mouvement des diapasons tout à fait aigus, sous l'influence du courant électrique, est trop faible, pour que je puisse l'employer sans troubler l'expérience par le bruit des étincelles électriques.

J'ai fait la première série d'expériences avec les huit diapasons allant du *si*$\flat_0$ au *si*$\flat_3$. Je pouvais reproduire l'OU, l'O, l'EU et même l'A, mais celui-ci n'était pas très-mordant parce que les harmoniques ut_4 et $ré_4$, immédiatement au-dessus du *si*$\flat_3$ caractéristique, et encore notablement renforcés dans la voyelle naturelle, faisaient défaut dans l'expérience. Le son fondamental de cette série, le *si*$\flat_0$ pris tout seul, donnait un OU très-sourd, beaucoup plus sourd que le langage ne peut le produire. Le son se rapprochait de l'OU quand on faisait vibrer en même temps, mais faiblement, le second et le troisième son partiels *si*$\flat_1$ et fa_2. On obtenait un très-bel O en donnant fort le *si*$\flat_2$, et plus faiblement le *si*$\flat_1$ le fa_2 et le $ré_3$. Le son fondamental *si*$\flat_0$ devait être un peu étouffé. En modifiant brusquement la position des couvercles des résonnateurs, de manière à rendre au *si*$\flat_0$ toute sa force et à affaiblir tous les harmoniques, l'appareil donnait très-bien et très-nettement un OU après un O.

J'obtenais un A ou plutôt un A°, en faisant sortir aussi forts que possible les sons les plus élevés de la série, du cinquième au huitième, et affaiblissant les autres.

Quant aux voyelles de la seconde et de la troisième série, caractérisées par des sons encore plus aigus, on ne peut que très-imparfaitement les reproduire en donnant leurs résonnances graves. On ne pouvait même pas les distinguer nettement par elles-mêmes, mais seulement par opposition à l'OU et à l'O, quand on alternait avec ces dernières voyelles. L'appareil donnait un AI passablement net, quand je renforçais surtout le quatrième et le cinquième sons partiels, en affaiblissant les plus graves, et une espèce d'É quand je renforçais le troisième, affaiblissant tous les autres. La différence de ces deux voyelles avec l'O consistait principalemeut en ce que le son fondamental et ses octaves devaient être beaucoup plus faibles dans l'AI et l'É, que dans l'O (1).

(1) Il faut corriger d'après ces indications les résultats consignés dans les *Comptes rendus de Munich*, du 20 juin 1859. Je ne connaissais pas encore, à ce moment, les harmo-

Pour pouvoir étendre les expériences aux voyelles ouvertes, je me suis fait construire plus tard encore les diapasons *ré*$_4$, *fa*$_4$, *la* ♭$_4$, *si* ♭$_4$ (les deux derniers sonnent déjà très-faiblement), et j'ai pris pour son fondamental le *si* ♭$_1$, au lieu du *si* ♭$_0$ de tout à l'heure. J'ai pu alors reproduire très-bien l'A et l'AI ; l'É était au moins beaucoup plus net que précédemment. Mais je n'ai pu atteindre jusqu'au son caractéristique de l'I.

Avec cette série de diapasons plus aigus, le fondamental *si* ♭$_1$, pris tout seul, donnait encore l'OU. Le même diapason modérément ébranlé, et accompagné de son octave *si* ♭$_2$ donnée avec force et de la douzième *fa*$_3$ plus faible, donne l'O dont la caractéristique est précisément le *si* ♭$_1$. On obtient l'A en ajoutant au *si* ♭$_1$ le *si* ♭$_2$ et le *fa*$_3$ avec une intensité modérée, et en faisant résonner énergiquement le *si* ♭$_3$ et le *ré*$_4$ comme des sons caractéristiques. Pour changer l'A en AI, il faut un peu renforcer le *si* ♭$_2$ et le *fa*$_3$ voisins de la caractéristique grave *ré*$_3$, étouffer le *si* ♭$_3$, et donner toute la force possible au *ré*$_4$ et au *fa*$_4$. Pour l'É, il faut donner aux deux sons les plus graves de la série, *si* ♭$_1$ et *si* ♭$_2$ une intensité modérée, parce qu'ils avoisinent la résonnance grave *fa*$_2$, et faire sortir aussi fort que possible, les sons les plus aigus *fa*$_4$, *la* ♭$_4$, *si* ♭$_4$. Mais je n'ai pu encore réussir aussi bien pour cette voyelle que pour les autres, parce que les diapasons aigus étaient trop faibles, et que les harmoniques immédiatement au-dessus du son caractéristique, ne pouvaient, comme on voit, entièrement disparaître.

De même que les voyelles de la voix humaine, les sons des différents registres de l'orgue peuvent être reproduits par notre appareil, pourvu qu'ils ne présentent pas d'harmoniques trop aigus ; il manque cependant toujours, aux sons imités, le bruit aigre et sifflant que donne le courant d'air en se brisant contre les lèvres du tuyau. Les diapasons ne peuvent reproduire que la partie purement musicale du son. Pour l'imitation des instruments à anche, il manque les harmoniques mordants dans le haut ; on peut cependant reproduire le nasillement de la clarinette, au moyen d'une série d'harmoniques impairs, et le son doux du cor au moyen du chœur complet de tous les diapasons.

Mais, quoiqu'il soit impossible d'imiter tous les sons avec cet appareil, il permet cependant de trancher l'importante question de savoir si le timbre est altéré par une variation de la différence de phase. Comme je l'ai déjà dit, en commençant le chapitre, cette question est d'une importance fondamentale dans la théorie des sen-

niques supérieurs de l'É ou de l'I, et je faisais l'O trop sourd, afin de le distinguer de l'E imparfait.

sations auditives. Mais je dois m'excuser auprès des lecteurs peu familiarisés avec la physique, si l'exposé des expériences de nature à décider la question leur paraissait difficile et aride.

La manière la plus simple de modifier les phases des sons partiels consiste à fausser un peu les tuyaux de résonnance en rétrécissant leur orifice ; on affaiblit ainsi la résonnance et, en même temps, la phase se modifie. Si le tuyau de résonnance est accordé de manière que le son de plus forte résonnance coïncide exactement avec le son du diapason considéré, la théorie mathématique nous apprend (1), que la plus grande vitesse de l'air, à l'embouchure du tuyau, de dedans en dehors, coïncide avec la plus grande vitesse des extrémités du diapason, de dehors en dedans. Si, au contraire, le tuyau est accordé un peu plus bas, la plus grande vitesse de l'air se produit un peu plus tôt, et, s'il est accordé plus haut, un peu plus tard que la plus grande vitesse du diapason. Plus on modifie le ton, plus la différence de phase est considérable ; elle peut atteindre, comme limite, un quart de la durée totale de la vibration. La grandeur de la différence de phase est ici exactement liée à l'intensité de la résonnance, en sorte qu'on peut évaluer l'une par l'autre, dans une certaine mesure. Si nous représentons par 10 l'intensité du son dans le tuyau, pour l'unisson parfait du tuyau avec le diapason, et si nous supposons la durée d'une vibration entière partagée en 360 degrés comme la circonférence d'un cercle, les relations de l'intensité de la résonnance et de la différence de phase sont représentées de la manière suivante :

Intensité de la résonnance.	Différence de phase en degrés.
10	0°
9	35° 54′
8	50° 12′
7	60° 40′
6	68° 54′
5	75° 31′
4	80° 48′
3	84° 50′
2	87° 42′
1	89° 26′

Il s'ensuit, qu'un affaiblissement relativement petit de la résonnance au moyen de la modification du ton, produit des différences de phases considérables, tandis que, pour de plus grands affaiblissements, les phases ne se modifient plus que d'une petite quantité. On peut utiliser cette circonstance, pour produire au moyen des diapasons

(1) Voir Supplément VIII.

toutes les variations de phase possibles dans la composition des voyelles ; on n'a besoin que de faire avancer le couvercle devant le tuyau résonnant, de manière à affaiblir notablement l'intensité du son. Si on sait déterminer à peu près le rapport dans lequel l'intensité a diminué, on trouve, d'après la table ci-dessus, la différence de phase. De cette manière, on peut modifier les vibrations du son considéré, d'une quantité quelconque, pouvant atteindre jusqu'au quart de la durée totale de la vibration. On obtient une variation de phase égale à la durée d'une demi-vibration, en faisant passer le courant électrique en sens contraire dans l'électro-aimant du diapason considéré. Les extrémités du diapason sont alors repoussées par l'électro-aimant, pendant le passage du courant, au lieu d'être attirées, et le mouvement des branches se produit dans un sens exactement opposé. Mais on ne peut continuer longtemps à renverser ainsi le sens du courant, parce que l'aimantation du diapason serait peu à peu affaiblie, tandis que le courant en sens normal la renforce, ou l'entretient à son maximum. On sait que l'aimantation d'un morceau de fer soumis à de forts ébranlements se modifie facilement.

Si l'on a composé, de cette manière, un son dans lequel certains sons partiels sont affaiblis ou modifiés dans leur phase, en ouvrant à demi les orifices de quelques tuyaux résonnants, on peut recomposer le même son en affaiblissant dans la même proportion les sons partiels, mais sans modification de la phase, ce qui se fait en laissant les tuyaux tout ouverts, mais en les éloignant un peu du diapason vibrant, jusqu'à ce que le son soit suffisamment éteint.

Faisons résonner, par exemple, simultanément les diapasons *si* $\flat_0$ et *si* $\flat_1$, d'abord avec les tuyaux parfaitement ouverts et absolument à l'unisson ; leurs vibrations se disposent de manière que les points *e* et d_0 coïncident dans les ondes aériennes des figures 31 A et B, p. 153, et que, dans les parties plus éloignées de la chambre, la courbe composée C correspond aux vibrations de l'air. On peut ensuite faire venir le point *e* de la courbe B, entre les points d_0 et d_2 de la courbe A en fermant de plus en plus le tuyau résonnant du diapason *si* $\flat_0$. Si *e* tombe en d_1, l'intensité du *si* $\flat_0$ deviendra environ les $\frac{3}{4}$ de ce qu'elle était, les résonnateurs ouverts. D'autre part, on peut faire coïncider les points *e* et d_2 en changeant le sens du courant dans un des électro-aimants, et en ouvrant entièrement les résonnateurs. Enfin, en ouvrant incomplétement le tuyau *si* $\flat_0$, on peut faire voyager le point *e* vers le point d_4. D'autre part, si le point *e* coïncide soit avec d_0 (ou ce qui revient au même, avec d_4), soit avec d_4, on peut le faire rétrograder de d_4 en d_3, ou de d_2 en d_1, en ouvrant incomplétement le tuyau *si* $\flat_0$. On peut donc, dans tous ces cas, rendre égaux les rapports des intensités des deux sons, sans modifier

les phases, en éloignant l'un ou l'autre tuyau de leurs diapasons respectifs, sans changer l'ouverture des orifices.

On peut donc, comme on vient de le voir, produire toutes les différences de phases possibles entre deux tuyaux résonnants donnés. On peut aussi, naturellement, faire la même expérience pour un nombre quelconque de tuyaux. J'ai cherché à produire ainsi un grand nombre de combinaisons de sons, où je faisais varier la différence de phase, mais je n'ai jamais vu la plus petite modification se produire dans le timbre. Il restait toujours exactement le même, lorsque j'affaiblissais isolément les sons partiels soit en ouvrant plus ou moins les tuyaux, soit en les éloignant des diapasons ; on peut donc résoudre la question précédemment posée, en disant que *le timbre de la portion musicale d'un son dépend seulement du nombre et de l'intensité des sons partiels, mais non de leurs différences de phase.*

Jusqu'ici la démonstration de ce principe se fait très-facilement par l'expérience, mais elle repose seulement sur une considération théorique, à savoir, que les phases se modifient avec l'intensité du son, laquelle ne peut être donnée que par la théorie mathématique. Nous ne pouvons pas rendre immédiatement visibles les variations de phase. On peut cependant modifier un peu l'expérience de manière à rendre immédiatement visible la variation de phase, en altérant la justesse, non des tuyaux de résonnance, mais des diapasons, ce qui se fait facilement en y collant de petits morceaux de cire. Les phases d'un diapason, vibrant sous l'influence d'un courant électrique, obéissent à la même loi que celles des tuyaux de résonnance. La phase varie successivement d'un quart de la durée de la vibration, si, faussant le son du diapason, l'intensité du son est portée successivement de son maximum à zéro. La phase du mouvement de l'air conserve toujours le même rapport avec la phase de la vibration du diapason, quand la hauteur du son, qui est déterminée par le nombre de décharges électriques, n'est pas altérée par la surcharge de la branche. Cette variation de phase du diapason peut être observée au moyen du microscope à vibrations de Lissajou, déjà décrit plus haut, et représenté dans la figure 22, page 114. On place horizontalement le diapason et le microscope de l'instrument, verticalement le diapason qu'on veut étudier ; on saupoudre d'un peu d'amidon l'extrémité supérieure de l'une des branches ; on dirige le microscope sur l'un des grains d'amidon, et on fait vibrer les deux diapasons au moyen des courants électriques de l'appareil interrupteur (*fig.* 33). Le diapason de l'instrument de Lissajou est à l'unisson du diapason interrupteur. Le grain d'amidon vibre suivant une ligne horizontale, l'objectif du microscope suivant une ligne verticale, et la composition des deux

mouvements donne naissance à des courbes, comme dans les observations précédemment décrites sur les cordes de violon.

Si le diapason observé est exactement à l'unisson avec l'interrupteur, la courbe est une droite oblique (*fig.* 34,1), où les deux

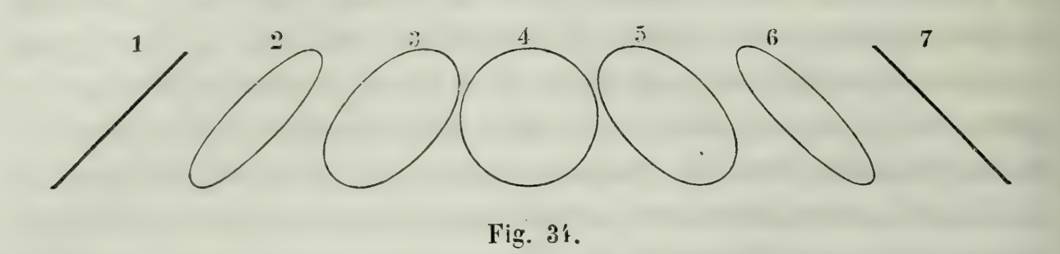


Fig. 34.

diapasons passent en même temps par leur position d'équilibre ; la ligne droite se transforme successivement en ellipses allongées et obliques (2, 3), en un cercle ou ellipse verticale (4), quand la différence de phase s'élève au quart de la durée de vibration ; elle revient par les mêmes ellipses autrement disposées (5, 6), à une ligne droite oblique (7), quand la différence de phase croît peu à peu jusqu'à la moitié de la durée de vibration.

Si le second diapason est à l'octave de l'interrupteur, les courbes présentent la série des formes 1, 2, 3, 4, 5 (*fig.* 35); 3 correspond

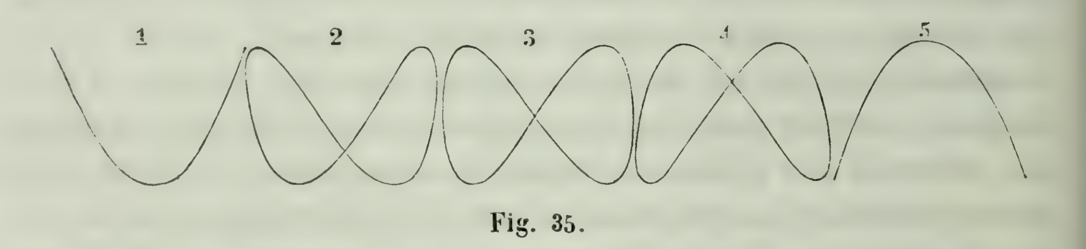


Fig. 35.

au cas où les deux diapasons passent en même temps par leur position d'équilibre, 2 et 4 correspondent à $\frac{1}{12}$, 1 et 5 à $\frac{1}{4}$ d'ondulation du diapason supérieur.

Si on met les diapasons, aussi exactement que possible, à l'unisson, de manière que tous deux vibrent avec toute leur force, et qu'on modifie ensuite un peu le ton, en mettant ou enlevant le morceau de cire, on voit en même temps, dans le microscope, une des figures se transformer en l'autre, et on peut ainsi, très-facilement, s'assurer de l'exactitude de la loi posée. Pour faire les expériences sur le timbre, on commencera par accorder exactement les diapasons sur les harmoniques de l'interrupteur, et on produira les proportions voulues de l'intensité en éloignant les tuyaux de résonnance, puis on faussera les diapasons d'une quantité quelconque au moyen de petits morceaux de cire. Avec les observations microscopiques, on peut régler la grosseur de ces morceaux de cire de manière à donner à la différence

de phase la valeur que l'on veut. Mais on affaiblit en même temps les vibrations des diapasons, et il faut, par conséquent, rapprocher ou éloigner les tuyaux de résonnance, de manière à rendre à l'intensité des sons partiels sa valeur primitive.

Dans ces dernières expériences où on fausse les diapasons, le résultat est encore le même que dans celles où l'on faussait les tuyaux de résonnance, c'est-à-dire qu'on ne peut apprécier aucune variation dans le timbre, au moins aucune assez nette pour qu'on puisse encore la reconnaître après le petit intervalle de quelques secondes qu'on emploie pour modifier l'appareil; en tout cas, le timbre ne varie pas assez pour pouvoir changer une voyelle en une autre.

Je dois mentionner ici une notable exception à cette règle. Si les diapasons *si*$\flat_0$ et *si*$\flat_1$ ne sont pas tout à fait justes, et qu'on les fasse vibrer soit par la percussion, soit au moyen de l'archet, une oreille exercée entend de très-faibles battements qui font l'effet de petits changements dans l'intensité et le timbre. Ces battements proviennent des variations de la différence de phase que présentent les diapasons vibrants. On en donnera l'explication dans le chapitre des sons résultants, et on y montrera que ces petites modifications du timbre résultent d'une petite modification de l'intensité de l'un des sons.

D'après cela nous pouvons poser une loi importante qui s'énonce en ces termes :

Les différences des timbres musicaux dépendent de la présence et de l'intensité des sons partiels, mais non de leurs différences de phase. Il faut bien remarquer qu'il ne s'agit ici que du timbre musical, tel que nous l'avons défini plus haut. Si le son est associé à des bruits non musicaux, tels que le roulement, le raclement, le sifflement et le bourdonnement, nous pouvons considérer ces derniers ou comme des mouvements non régulièrement périodiques, ou comme provenant d'harmoniques très-aigus, très-rapprochés les uns des autres, et très-dissonnants. Nous ne pouvons pas étendre nos expériences jusqu'à eux ; aussi devons-nous provisoirement laisser dans le doute la question de savoir, si la différence de phase doit entrer en jeu pour ces sons partiels dissonnants. Des considérations théoriques qui viendront plus tard établiront que, vraisemblablement, c'est ce qui a lieu en réalité.

Nous arrivons maintenant à étudier de plus près le rôle que joue l'oreille dans la perception des timbres. On supposait anciennement que l'oreille avait la faculté d'apprécier à la fois le *nombre* des vibrations, et par suite de déterminer la hauteur du son et la forme de la vibration d'où dépendait, à ce que l'on croyait, la différence de timbre. Cette dernière hypothèse reposait uniquement sur l'exclusion

des autres hypothèses admissibles. Comme on pouvait démontrer que deux sons, de même hauteur, ont nécessairement le même nombre de vibrations, et que l'intensité du son dépend évidemment de l'amplitude des vibrations, le timbre devait provenir d'un troisième élément, et il ne restait disponible que la forme de la vibration. Nous pouvons préciser encore davantage cette manière de voir. Les expériences précédemment décrites prouvent que des ondes de formes très-différentes (par exemple, *fig.* 31, C,D, *fig.* 12, C et D) peuvent donner le même timbre, et même, que, les sons simples exceptés, les formes d'ondes jouissant de cette propriété sont en nombre infini, car chaque modification de la différence de phase change la forme, mais non le timbre. Pour l'identité de deux timbres, la seule condition nécessaire est donc que les vibrations de l'air qui parviennent à l'oreille, présentent un même nombre de vibrations pendulaires de même intensité, en supposant que la décomposition en une somme de vibrations simples pendulaires puisse avoir lieu.

L'oreille ne distingue donc pas les diverses formes d'ondes comme l'œil distingue les représentations des diverses formes de vibrations ; elle subdivise plutôt, d'après une loi déterminée, les formes d'ondes en éléments plus simples qu'elle perçoit isolément comme sons harmoniques ; avec une attention suffisamment exercée, elle peut même les distinguer individuellement. L'oreille ne considère comme timbres différents que les différentes combinaisons de ces sensations simples.

Sous ce rapport, la comparaison de l'œil et de l'oreille est instructive. Quand le mouvement vibratoire devient visible, par exemple, au moyen du microscope à vibrations, l'œil est en état de distinguer toutes les formes diverses de vibrations, même celles qui se confondent pour l'oreille. En revanche, l'œil ne peut, comme l'oreille, exécuter immédiatement la décomposition des vibrations en vibrations simples. L'œil, armé du microscope, apprécie, en réalité, la forme de vibration, et distingue toutes les formes différentes ; l'oreille, au contraire, ne peut distinguer que les vibrations qui, décomposées en vibrations pendulaires, présentent des éléments constitutifs différents ; mais, en distinguant et percevant isolément ces derniers, elle reprend la supériorité sur l'œil qui ne peut arriver au même résultat.

Cette décomposition en vibrations pendulaires constitue une propriété très-curieuse de l'oreille. Le lecteur doit bien se souvenir que si nous avons appelé *composées* les vibrations émanant d'un seul instrument de musique, cette *composition* n'existe qu'au point de vue de la perception au moyen de l'oreille ou de la théorie mathématique, tandis qu'en réalité le mouvement des molécules d'air n'est pas composé mais simple, et qu'il est produit par une cause unique. En cher-

chant dans la nature des analogies avec une semblable décomposition des mouvements périodiques, nous n'en trouvons pas d'autre que le phénomène de la vibration par influence. En effet, supposons les étouffoirs d'un piano soulevés, et faisons résonner énergiquement n'importe quel son contre la table d'harmonie; nous ferons vibrer par influence une série de cordes, à savoir *toutes* les cordes, et *celles-là seulement*, qui correspondent aux sons simples contenus dans le son donné. Ici, par conséquent, il s'opère, d'une manière purement mécanique, une décomposition des ondes aériennes analogue à celle qui se produit dans l'oreille, en ce sens que l'onde, simple par elle-même, fait vibrer par influence un certain nombre de cordes, et que la vibration des cordes suit les mêmes lois que la sensation des harmoniques dans l'oreille.

La seule différence entre les deux appareils consiste en ce que, les cordes de piano vibrent aussi assez facilement sous l'influence des harmoniques, parce qu'elles se subdivisent en plusieurs parties vibrantes. Nous ferons abstraction de cette circonstance dans notre comparaison. D'ailleurs, il serait possible de construire un instrument, dont les cordes ne pussent vibrer fortement ou d'une manière appréciable, que sous l'influence du son fondamental, par exemple, en chargeant les cordes en leur milieu d'un poids, ce qui rendrait les sons partiels aigus non harmoniques avec le son fondamental.

Si nous pouvions donc rattacher chacune des cordes d'un clavier, à une fibre nerveuse, de manière que celle-ci fût ébranlée, donnât lieu à une sensation, chaque fois que la corde entrerait en mouvement, il arriverait précisément ce qui se passe dans l'oreille, c'est-à-dire que, tout son venant à rencontrer l'instrument, éveillerait une série de sensations, correspondant exactement aux vibrations pendulaires en lesquelles on peut décomposer le mouvement de l'air extérieur, et on percevrait ainsi, individuellement, chacun des harmoniques, comme le fait en réalité l'oreille. Dans ces conditions-là, les sensations des différents sons partiels aigus correspondraient à différentes fibres nerveuses, et, par conséquent, se produiraient tout à fait isolément, indépendamment les unes des autres.

Par le fait, les récentes découvertes des micrographes sur la construction intérieure de l'oreille, conduisent à admettre que cet organe présente des dispositions analogues à celles que nous venons d'imaginer. Ainsi l'extrémité de chacune des fibres des nerfs auditifs se trouve reliée à de petites parties élastiques, qui, à ce que nous devons supposer, vibrent sous l'influence des ondes sonores.

On peut décrire brièvement, ainsi qu'il suit, la construction intérieure de l'oreille.

Les extrémités molles des fibres nerveuses de l'audition s'épanouissent sur des membranes minces, dans une cavité remplie d'eau qu'on appelle oreille interne ou *labyrinthe*, à cause de sa forme compliquée.

Une autre portion de l'oreille, la cavité du tympan ou *caisse*, et ses appendices, est destinée à transmettre les vibrations de l'air au liquide de l'oreille interne en leur conservant une énergie suffisante. La figure 36 donne, en grandeur naturelle, une section schématique

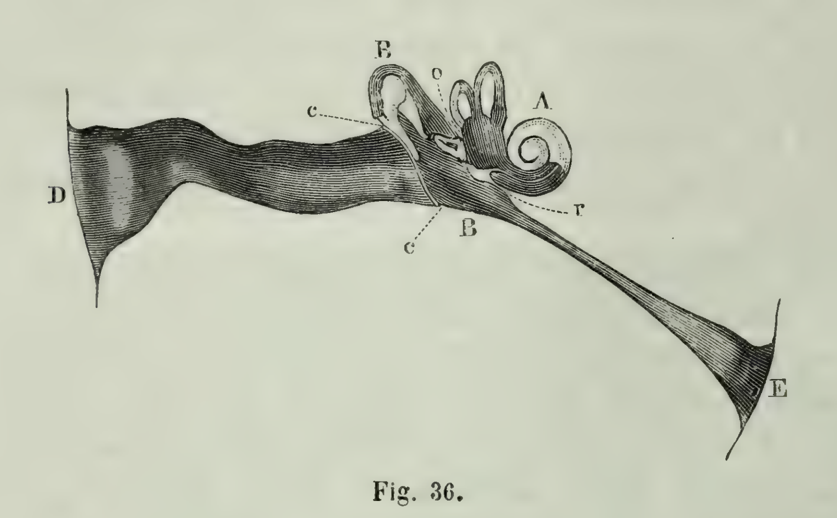


Fig. 36.

des cavités appartenant à l'organe de l'ouïe. A est l'oreille interne, BB la caisse, D le conduit en forme d'entonnoir qui aboutit au conduit auditif externe ; il se rétrécit le plus en son milieu, et s'élargit de nouveau un peu vers l'extrémité intérieure. Le conduit auditif externe est formé par un tube moitié cartilagineux, moitié osseux ; son extrémité intérieure est séparée de la caisse par une membrane circulaire mince, le *tympan*, *cc*, tendue assez lâche sur un anneau osseux. La *caisse* B est située entre le conduit auditif externe et l'oreille interne. Elle est séparée de cette dernière par des parois osseuses dans lesquelles il n'y a que deux orifices fermés par des membranes, les deux *fenêtres* du limaçon ; la fenêtre supérieure ou *ovale*, *o* (*fig.* 36), est reliée à un osselet de l'oreille, l'*étrier*. La fenêtre inférieure, ou *fenêtre ronde*, *r*, est sans communication avec les osselets.

La caisse est donc complétement close du côté du conduit auditif externe et du limaçon ; en revanche, elle aboutit librement à la partie supérieure de l'arrière-bouche, au moyen de la *trompe d'Eustache*, E, ainsi nommée parce que l'extrémité dirigée vers l'arrière-bouche, s'élargit comme le pavillon d'une trompe, tandis que le milieu du tuyau est très-étroit. La portion de la trompe qui communique avec la caisse est formée par des os ; la portion qui s'ouvre dans l'arrière-bouche est formée, au contraire, d'une plaque cartilagineuse flexible, fendue le long de la partie supérieure. Cette fente est fermée sur ses

bords par une membrane tendineuse. On peut faire entrer ou sortir l'air par la trompe d'Eustache, en fermant le nez et la bouche, et comprimant ou raréfiant l'air contenu dans cette dernière. Chaque fois que l'air entre dans la caisse ou en sort, on sent un choc subit dans l'oreille, et on entend un craquement. On remarquera ici que l'air ne passe de l'arrière-bouche dans l'oreille, ou inversement, qu'au moment où on fait un mouvement de déglutition. L'air qui a pénétré dans l'oreille y reste, même si on rouvre la bouche et le nez, jusqu'à ce qu'on fasse un nouveau mouvement de déglutition. A ce moment, il en sort, ce qui se reconnaît à un nouveau craquement ; de plus on perd le sentiment de la tension du tympan qui avait persisté jusque-là. Il résulte de ces expériences, que la trompe d'Eustache est ordinairement fermée, et qu'elle ne s'ouvre que quand on avale, ce qui s'explique parce que les muscles qui soulèvent le voile du palais, et qui agissent dans la déglutition, sont en partie fixés à l'extrémité cartilagineuse de la trompe. Habituellement donc, la caisse est entièrement close, et la pression de l'air qui la remplit demeure égale à la pression atmosphérique, parce que, de temps en temps, pendant les mouvements de déglutition, le gaz a occasion de communiquer avec l'atmosphère.

En deux endroits, l'air de la caisse n'est séparé de l'eau de l'oreille interne que par des membranes minces et tendues. Les ouvertures closes par ces membranes s'appellent la *fenêtre ovale* (*o*, *fig.* 36) et la *fenêtre ronde* (*r*) du labyrinthe. Les deux membranes sont en contact avec l'air de la caisse par leur surface externe, et avec l'eau du labyrinthe par leur surface interne ; la membrane de la fenêtre ronde est entièrement libre ; celle de la fenêtre ovale, au contraire, est reliée à la membrane du tympan au moyen d'une série de trois petits os articulés ensemble, *les osselets*. La figure 37 montre séparément les trois osselets en grandeur naturelle ; *m* est le *marteau*, *o* l'*enclume*, *t* l'*étrier*, *l* est un petit os, l'*os lenticulaire* inséré dans l'articulation entre l'enclume et l'étrier. La figure 38 montre, au contraire, la partie interne du tympan unie comme dans la réalité, aux deux premiers osselets, le marteau et l'enclume. Dans le marteau on distingue le manche *a*, la *tête b* et la *longue apophyse c*. Le manche est fixé au tympan, de manière que son extrémité tombe au centre de cette membrane, et la tire vers l'intérieur, lui donnant ainsi la forme d'un entonnoir. La tête *b* (*fig.* 38) du marteau est reliée à l'enclume par une

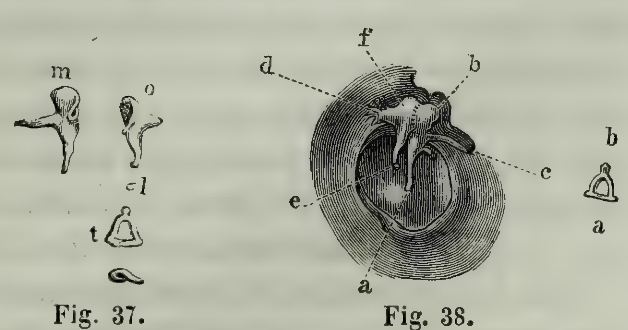


Fig. 37. Fig. 38.

articulation. La longue apophyse *c* est une feuille osseuse élastique, qui, dirigée en avant, est fixée dans une fente de l'os du rocher, supposée brisée dans le dessin. Le point du marteau où le manche et la tête se réunissent, porte encore un court prolongement dirigé vers le bord du tympan, fixé par un tendon rigide, et qui prend le nom de *courte apophyse;* il presse un peu en dehors la membrane du tympan. Du milieu du marteau, au-dessus de la *courte apophyse*, partent des cordons tendineux se dirigeant en dehors, en avant et en arrière ; ils sont assez rigides, surtout ceux dirigés en avant et en arrière, pour former une sorte d'axe de rotation du marteau. La longue apophyse est fixée en dedans des cordons tendineux dirigés en avant. Au reste, chez les personnes âgées, elle n'existe plus qu'à l'état rudimentaire. Elle donne d'ailleurs à cet axe de rotation qui n'est que ligamenteux une rigidité un peu plus grande.

L'enclume *f* a à peu près la forme d'une dent molaire avec deux racines *d* et *e*. La surface inférieure de la couronne de cette dent forme l'articulation avec le marteau ; la racine la plus longue *e* (longue apophyse de l'enclume) repose librement dans l'intérieur de la caisse, à peu près parallèlement au manche du marteau. La seconde racine plus courte *d* (courte apophyse de l'enclume), est horizontale, dirigée en arrière, et son extrémité est fixée par un lien non élastique à la paroi antérieure de la caisse. L'articulation, qui relie le marteau à l'enclume, peut être comparée, d'après son mode d'action, aux articulations dentelées, analogues à celles que nous trouvons dans une clef de montre. Si le manche du marteau, entraînant avec lui la membrane du tympan, est tiré en dedans, les deux prolongements dentelés de l'articulation se placent presque l'un sur l'autre, et l'enclume est obligée de suivre exactement le mouvement du marteau, en sorte que sa longue apophyse presse aussi en dedans. Si, au contraire, le manche du marteau est tiré en dehors par la membrane du tympan, les dents de l'articulation se séparent, et le marteau se retire sans forcer l'enclume à participer à son mouvement. Cette disposition empêche que, pour de fortes trépidations de la membrane du tympan, l'étrier ne puisse être arraché de la fenêtre ovale.

Le troisième osselet, l'*étrier*, ressemble tout à fait à l'objet qui lui donne son nom (*fig*. 38, *ab*). La base de l'étrier *a* est une plaque osseuse élastique qui s'appuie sur la membrane de la fenêtre ovale. L'arc *b* porte en son milieu une petite saillie reliée par une articulation à l'extrémité de la longue apophyse de l'enclume. La position relative des trois osselets est représentée figure 39 (oreille droite vue par devant). La membrane du tympan *aa* est tirée à l'intérieur par le bout *b* du manche du marteau ; *c* est la tête du marteau, *d* la lon-

gue apophyse de l'enclume, *e* la base de l'étrier dans la fenêtre ovale. Ce dernier couvre presque entièrement la fenêtre de manière à ne laisser libre autour de sa base qu'un rebord très-étroit de la membrane. Si l'air est chassé dans le conduit auditif, il presse le tympan de dehors en dedans, ce qui pousse aussi de dehors en dedans le manche du marteau. Le marteau et l'enclume exécutent en même temps, autour de leur axe commun, le mouvement de rotation précédemment décrit. La longue apophyse de l'enclume se déplace alors vers l'intérieur et pousse l'étrier sur la fenêtre ovale. Telle est la manière dont se meuvent les osselets; on peut s'en assurer sur des préparations anatomiques de l'oreille, en ouvrant les cavités sans attaquer les liaisons des osselets, en comprimant ou raréfiant l'air au moyen d'un tube adapté dans le conduit auditif externe, de manière à se rapprocher de la pression variable de l'air dans les ondes sonores. L'étrier est très-peu mobile, parce que sa base est fixée sur la fenêtre ovale par un repli membraneux très-étroit.



Fig. 39.

Grâce à cette disposition, les mouvements vibratoires de l'air sont transmis au liquide de l'oreille interne. Quoique le cas le plus favorable soit celui où la membrane est en contact avec l'air des deux côtés, une membrane tendue est encore ébranlée par les ondes aériennes, lorsqu'elle est d'un côté en contact avec de l'air, et de l'autre en contact avec de l'eau. C'est là le cas des membranes des fenêtres ronde et ovale. Celles-ci sont déjà par elles-mêmes propres à transmettre les trépidations de l'air au liquide de l'oreille interne, et l'ouïe, par conséquent, existe encore, mais est notablement affaiblie quand l'appareil de la caisse est endommagé, par exemple, si le tympan est percé, ou si l'articulation entre l'enclume et l'étrier est déchirée. D'après les découvertes de J. Müller, la transmission paraît se faire beaucoup mieux au moyen d'une membrane qui, comme le tympan, est en contact avec l'air des deux côtés. Il faut ajouter à cela que le tympan, comparé à la membrane de la fenêtre ovale, a une surface relativement grande sur laquelle agissent les ondes sonores du conduit auditif, et que, par le moyen des osselets, cette action se transmet et se concentre sur la petite surface de la base de l'étrier.

Nous arrivons maintenant à la description de l'oreille interne, la partie intérieure de l'organe de l'ouïe, et dans laquelle s'épanouissent les nerfs. C'est une cavité complétement close, remplie d'eau. A l'exception des deux fenêtres, cette cavité est terminée par des parois entièrement osseuses, et forme une excavation dans la masse osseuse,

particulièrement résistante et dense, du rocher. La figure 40 en donne un dessin schématique, et la figure 41 une vue perspective où l'excavation est représentée coupée par la moitié. Dans la figure 40 on voit plus nettement l'ensemble des différentes parties. On distingue dans l'oreille interne deux parties principales : le *vestibule* A et les *canaux semi-circulaires* B d'une part, le *limaçon* C d'autre part. La fenêtre ovale sur laquelle repose l'étrier est représentée en *a* et la fenêtre ronde en *b ;* les portions noires désignent la masse osseuse du rocher. Le vestibule A est une cavité arrondie séparée de la caisse par la

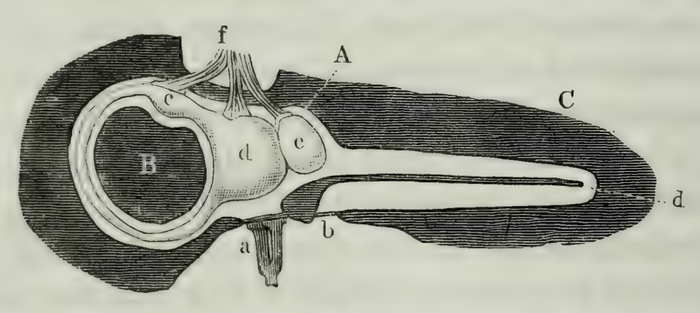


Fig. 40.

membrane de la fenêtre ovale *a*. Il en sort trois canaux semi-circulaires dont un seul, B, est représenté dans la figure 40. Tous trois sont dans des plans respectivement perpendiculaires entre eux, comme le montre la figure 41. Chacun d'eux est un cylindre courbe dont les deux extrémités débouchent dans le vestibule. Chacun, à l'une de ses extrémités, présente un renflement arrondi en forme de bouteille, ce qu'on appelle une *ampoule c*.

A l'intérieur de ces excavations osseuses, se trouve ce qu'on appelle le *labyrinthe membraneux* (vestibule et tubes membraneux), formé par une membrane tendre, nageant dans l'eau, presque partout parallèle aux parois des cavités osseuses, peu éloignée d'elles, et qui semble ne tenir à ces parois que par les fibres nerveuses et les vaisseaux sanguins. La forme du labyrinthe membraneux *c*, *d*, *e* correspond donc en somme à celle du labyrinthe osseux ; il est seulement plus étroit ; en outre le vestibule membraneux est divisé en deux petits sacs, le plus grand demi-ovale *d*, et le plus petit rond *e* (1). D'ailleurs le labyrinthe membraneux a les mêmes trois canaux semi-circulaires, chacun muni d'une ampoule (*fig.* 41, *h*, *h*). La cavité du labyrinthe membraneux est entièrement close, et remplie de liquide (le liquide intérieur du labyrinthe) ; en outre il existe, dans l'intérieur des petits sacs, de petits cristaux calcaires qu'on appelle le *sable de l'ouïe*. Les

(1) D'après de récentes découvertes, le petit sac *e* est relié au canal de la paroi du limaçon.

faisceaux des nerfs de l'audition (*fig.* 40, *f*; *fig.* 41, *g*, *g*) vont comme des fibres molles, des parois osseuses au labyrinthe membraneux, en passant par le liquide, et se terminent en des points particuliers de la membrane qui présentent des renflements en forme de tumeurs. Il y a un renflement nerveux de ce genre dans chaque petit sac du vestibule et dans chaque ampoule. On décrira plus bas la manière particulière dont se terminent les nerfs.

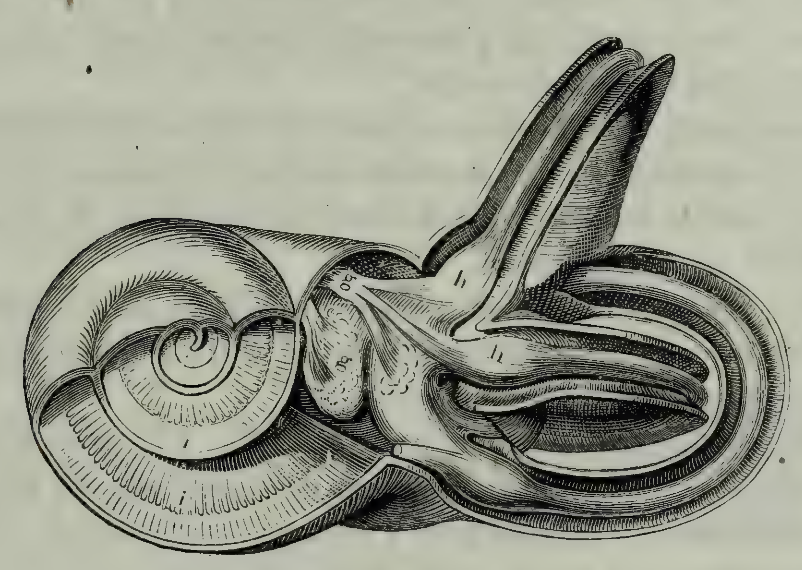


Fig. 41.

La seconde partie principale de l'oreille interne est le *limaçon* C, ainsi nommé parce que la cavité a la forme de la coquille de cet animal. Dans la figure 40, on a supposé le canal déroulé autour de son axe et rendu rectiligne, de manière à faire mieux voir la liaison des cavités. La figure 41 montre le canal du limaçon avec ses replis naturels, moitié coupé, moitié fermé. Ce canal est partagé en deux, par une cloison qui ne présente qu'une ouverture étroite (Hélicotréma), à la pointe *d* (*fig.* 40). L'une des moitiés du canal (rampe du vestibule) débouche en *e* dans le vestibule, l'autre moitié (rampe de la caisse) court le long de la caisse dont elle est séparée par la membrane de la fenêtre ronde. La cloison est formée par une cannelure osseuse et une membrane qui, toutes deux, se prolongent tout le long du canal du limaçon, en sorte que la cannelure osseuse est fixée le long de la paroi interne du canal tortueux, et que la cloison membraneuse (*fig.* 41, *i*, *i*) est tendue de la paroi externe du canal à la cannelure osseuse.

Quand la membrane du tympan est poussée vers l'intérieur par une plus forte pression de l'air dans le conduit auditif, elle pousse aussi les osselets vers l'intérieur, comme on l'a dit plus haut, et la base de l'étrier pénètre plus profondément dans la fenêtre ovale. Le liquide de

l'oreille interne, qui est d'ailleurs renfermé entre des parois osseuses solides, n'a qu'une issue pour céder à la pression de l'étrier; c'est la fenêtre ronde avec sa membrane flexible. Mais, pour parvenir jusque-là, le liquide doit ou bien s'écouler de la rampe du vestibule à celle de la caisse, par l'hélicotréma, l'orifice étroit au sommet du limaçon, ou bien il doit se comprimer dans la direction de la cloison membraneuse contre la rampe du limaçon, parce que, vraisemblablement, la courte durée des vibrations sonores ne suffirait pas pour exécuter le premier mouvement. Le phénomène inverse aurait lieu, si l'air était raréfié dans le conduit auditif.

Par conséquent, les vibrations sonores de l'air contenu dans le conduit auditif externe sont, en dernière analyse, transmises aux membranes de l'oreille interne, c'est-à-dire à la membrane du limaçon et aux nerfs qui s'y épanouissent.

J'ai déjà dit que les prolongements terminaux de ces nerfs sont reliés à de très-petits appendices élastiques, qui paraissent destinés à ébranler les nerfs par leurs vibrations.

En ce qui concerne d'abord les nerfs g, g (*fig.* 41), du vestibule, ils se terminent à certaines parties épaisses des petits sacs du labyrinthe membraneux, où le tissu plus gros a presque la consistance d'un cartilage. On trouve une partie ainsi garnie de nerfs, en forme d'une tumeur, dans l'intérieur de l'ampoule de chacun des canaux semi-circulaires, et dans chacun des petits sacs du vestibule. Les fibres nerveuses se trouvent ici entre les cellules molles et cylindriques de la membrane fine (épithélium), qui tapisse la surface intérieure des tumeurs. Dans les ampoules, Max Schultze a découvert, s'élevant hors de la surface interne de cet épithélium, des crins élastiques roides tout à fait particuliers, qui sont représentés figure 42. Ils sont beaucoup plus longs que les crins ciliaires des cellules de mica (longs de $\frac{1}{25}$ de ligne dans les roches), fragiles, et se terminent en pointe très-fine. De petits crins de ce genre, fins et roides, sont évidemment et à un haut degré, propres à suivre les mouvements du liquide, et, par suite, à produire une excitation mécanique dans les cordons nerveux implantés entre leurs bases, dans l'épithélium mou.

Les tumeurs épaisses, situées dans les vestibules où viennent se terminer les nerfs, présentent, d'après Max Schultze, le même épithélium tendre dans lequel sont insérées les fibres nerveuses, mais point de crins, ou seulement de très-courts. Par contre, tout près de la surface riche en nerfs, se trouvent des concréments calcaires, les *otolithes*, qui, chez les poissons, sont de petits corpuscules convexes concaves, reliés entre eux, et qui, sur leur face convexe, portent l'empreinte du bulbe nerveux. Chez l'homme, au contraire, les

otolithes sont de petites agglomérations de corpuscules cristallins de forme allongée, anguleuse, qui adhèrent étroitement à la membrane des sacs et paraissent y être fixés. Ces otolithes paraissent éminemment propres à provoquer une excitation mécanique dans la masse nerveuse, à chaque mouvement brusqne du liquide du labyrinthe. La membrane fine et légère, ainsi que la masse nerveuse qu'elle contient, suit immédiatement, selon toute vraisemblance, le mouvement du liquide, tandis que les petits cristaux, plus pesants, sont plus lents à s'ébranler, mais aussi conservent plus longtemps leur mouvement, de manière à tantôt tirer, tantôt pousser la masse nerveuse voisine. Ainsi les conditions remplies pour l'excitation des nerfs sont tout à fait analogues à celles du tétanomoteur de Heidenhain. Dans cet instrument, le nerf d'un muscle est soumis à l'action d'un petit marteau d'ivoire vibrant très-rapidement, en sorte qu'à chaque coup, le nerf est pressé, mais non écrasé. On obtient ainsi dans le nerf une excitation énergique et prolongée, dont on constate l'existence par la contraction également énergique et prolongée, qui se produit en même temps dans le muscle correspondant. Les parties de l'oreille précédemment décrites semblent disposées de manière à déterminer une excitation mécanique du même genre.

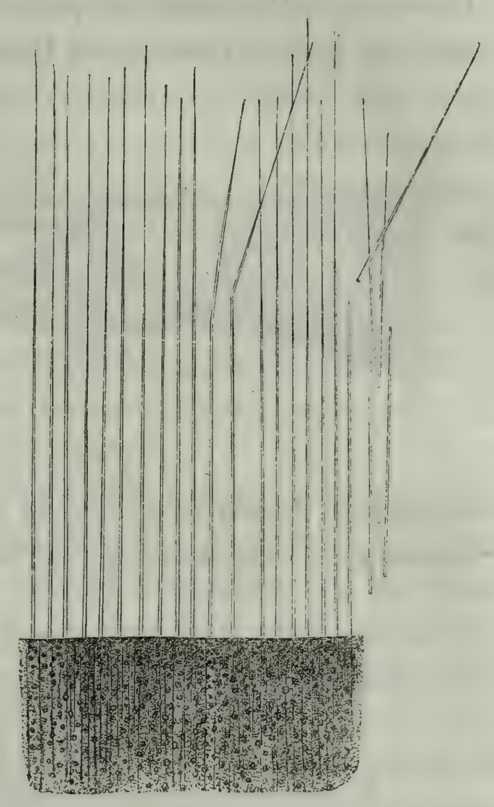


Fig. 42.

La structure du limaçon est beaucoup plus compliquée. Les faisceaux nerveux pénètrent par l'axe ou pivot du limaçon, d'abord dans la partie osseuse, puis dans la partie membraneuse du limaçon ; là se trouvent les prolongements particuliers, découverts tout récemment par le marquis de Corti, appelés *organes de Corti*, et qui terminent les nerfs.

La figure 43 donne une section schématique de la cloison membraneuse du limaçon, aussi exactement que les observations effectuées jusqu'ici permettent de le faire. La figure 44 représente exactement la même partie, vue d'en haut et un peu de côté, d'après une préparation de Deiters. Dans les deux dessins, les mêmes parties sont désignées par les mêmes lettres. La cloison membraneuse du limaçon est

formée, comme on le voit dans la figure 43, de deux membranes qui comprennent entre elles un espace appelé *rampe moyenne* du limaçon. Cette rampe moyenne contient les extrémités des nerfs et les organes qui s'y rattachent. Dans la figure 43, il faut supposer qu'au-

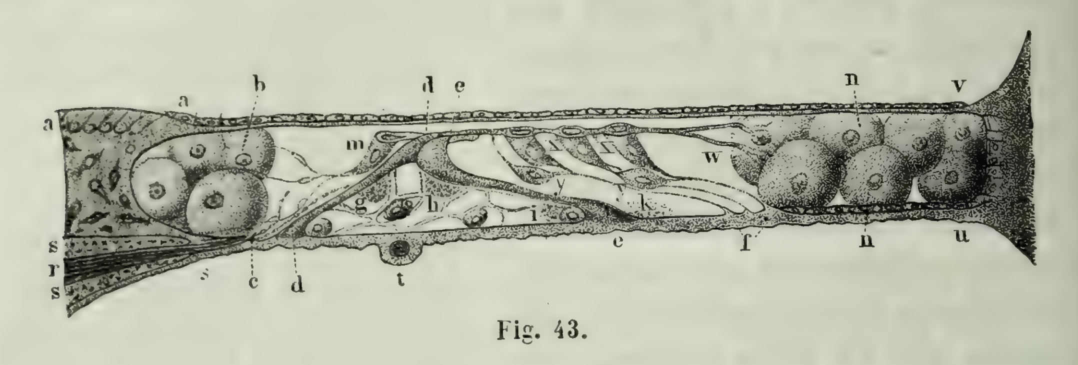


Fig. 43.

dessus du dessin se trouve la rampe du vestibule du limaçon, et au-dessous celle de la caisse ; *sss* représente le bord de la cloison osseuse,

Fig. 44.

qui est ici fendue en deux feuilles osseuses, entre lesquelles sortent les fibres nerveuses *r*. Celles-ci traversent en *c* le commencement de

la cloison membraneuse, suivant une série de trous (*fig.* 44, *c*), et arrivent ainsi à la région de la rampe moyenne. Les deux membranes qui ferment la cavité de cette rampe sont :

1° La *membrane du fond* (*membrana basilaris*) *c u* (*fig.* 43), qui part elle-même du bord de la cloison osseuse, et sépare la rampe moyenne de celle du tympan. On voit en *t* la section d'un vaisseau qui se prolonge dans toute la longueur. Cette membrane est très-élastique et évidemment assez tendue tant qu'elle est en place, car elle se retire et se plisse d'une manière notable, si on en coupe de longues bandes.

2° *La membrane supérieure de Corti*, *av* (manque dans la *fig.* 44) ; elle part d'un bourrelet formé par le tissu osseux, et présentant au bord une série d'apophyses en forme de dents.

Les deux membranes s'appuient sur la cannelure saillante (*uv*), de la cloison opposée du canal du limaçon. La membrane de Corti présente en *v* un réseau de fibres au moyen desquelles elle est fixée aux os. On n'a pu encore décider si les mailles du réseau sont ouvertes entre les fibres et laissent communiquer la rampe moyenne avec celle du vestibule (1).

La cavité de la rampe moyenne est remplie le long de son bord intérieur en *b*, et de son bord extérieur en *nn*, de grosses cellules sphériques transparentes. Dans la partie moyenne qui, selon Deiters, n'a pas de ces cellules, on trouve donc les prolongements dont il s'agit ici. Les plus forts et les plus saillants sont les *arcs* ou *fibres de Corti*. Chacun d'eux consiste en une partie ascendante *d d*, ou fibre de la première série, et une partie descendante ou fibre de la seconde série. Les fibres de la première série sont des prolongements plans, faiblement recourbés en S, qui s'élèvent au moyen d'un renflement inférieur de la *membrana basilaris*, à laquelle ils sont fixés, et se terminent en haut par une sorte de point d'articulation, formant la jonction avec les fibres de la seconde série. Dans la figure 44 on voit un grand nombre de ces fibres ascendantes, régulièrement disposées les unes à côté des autres. Elles sont placées de la même manière et très-serrées dans toute la longueur de la membrane du limaçon, en sorte qu'on peut estimer leur nombre à plusieurs milliers. Elles s'appliquent latéralement d'une manière presque complète sur

(1) D'après des recherches récentes de Reissner, Lowenberg, Hensen, au-dessus de la membrane de Corti *av* (*fig.* 43), il y a encore une troisième membrane, dite de Reissner, qui a la même origine en *a* que celle de Corti, mais qui va s'attacher, beaucoup plus haut que cette dernière, à la paroi externe du limaçon. C'est elle qui sépare le conduit moyen du limaçon de la rampe du vestibule. La membrane de Corti est très-tendue, et présente, en *b*, un renflement qui lui permet de remplir, jusqu'en *m*, l'espace où sont dessinées les grosses cellules.

les fibres voisines, et paraissent même réunies avec elles, mais de manière à laisser, par places, dans la ligne de jonction, des fentes ouvertes par où passent probablement les filaments nerveux. Les fibres de première série, considérées dans leur ensemble, forment donc une sorte de protubérance résistante qui, tant que les points d'attache naturels ne rencontrent pas d'obstacles, tend à prendre une position verticale ; aussi, dans ce cas, la *membrana basilaris* se replie entre les points de contact des arcs de Corti *d* et *e*.

Les *fibres de deuxième série* qui forment la portion descendante du corpuscule *de* (*fig.* 43), sont des cordons cylindriques lisses, flexibles et renflés du bout. L'extrémité supérieure forme une sorte de point d'articulation, à la jonction avec les fibres de première série ; l'extrémité inférieure s'épanouit en forme de cloche, et vient se fixer sur la *membrana basilaris*. Dans les préparations microscopiques, on les voit affecter les courbures les plus diverses ; mais, sans doute possible à l'état naturel, elles sont disposées, tendues dans une certaine mesure, de manière à tirer les fibres de première série par leur extrémité supérieure. Tandis que les fibres de première série partent du bord intérieur de la membrane, qui, relativement, ne peut être que faiblement ébranlé, les fibres de la seconde série sont fixées environ sur le milieu de la membrane, c'est-à-dire précisément aux points où les vibrations doivent être le plus fortes. Si la pression du liquide du labyrinthe dans la rampe du tympan s'accroît sous l'influence de l'étrier s'enfonçant plus profondément dans la fenêtre ovale, la *membrana basilaris* doit être courbée vers le bas, la tension des fibres de seconde série augmente, et peut-être le point correspondant de la première série est-il un peu déplacé vers le bas. D'ailleurs, il ne paraît pas très-probable, que les fibres de première série se meuvent beaucoup individuellement, car leurs attaches latérales sont encore assez fortes pour que, détachées de leur position dans la préparation anatomique, elles restent quelquefois unies entre elles en grand nombre formant, comme une sorte de membrane. L'organe de Corti est un appareil destiné à recevoir les vibrations de la *membrana basilaris* et à entrer lui-même en vibrations ; on ne peut en douter d'après la disposition générale, mais nos connaissances actuelles ne nous permettent pas de déterminer exactement de quelle manière ces vibrations s'effectuent. Il faudrait apprécier la dureté des différentes parties, leur degré de tension, et leur flexibilité mieux que l'observation des parties isolées, telles que le hasard les a placées sous le microscope, n'a permis de le faire jusqu'ici. Ce qui me paraît le plus vraisemblable, c'est que la série des premières fibres forme une sorte de chevalet élastique, entre le bord duquel et le centre de la

membrane sont fixées les fibres descendantes, minces et flexibles comme des cordes, et qui vibrent de la même manière quand leur autre extrémité est ébranlée sur la membrane. Par le fait, une corde vibre avec force quand une de ses extrémités est liée à un corps vibrant, par exemple, un diapason, et surtout lorsqu'elle est à l'unisson du son auquel elle est associée.

Les fibres de Corti sont encore entourées et composées d'une foule d'appendices très-délicats et très-fragiles, partant des fibres et des cellules de diverses natures, soit des prolongements très-déliés unissant les filaments nerveux aux cellules nerveuses correspondantes, soit des tissus fibreux qui paraissent servir à consolider la fixation et la suspension des appendices nerveux.

Dans cette dernière catégorie, se range, en particulier, le réseau remarquablement régulier qui se dirige du haut de l'arc vers l'extérieur, qu'on appelle *membrana reticularis* (se voit le mieux dans la *fig.* 44 entre les lignes *ii* et *kk;* vu seulement par la tranche de *e* en *w* dans la *fig.* 43). Vers l'extérieur, elle se décompose en fibres ramifiées qui s'entremêlent aux grosses cellules *n*, *n*. Vers le bas, ces dernières sont reliées immédiatement aux cellules de Corti *x*,*x* (1), et, à d'autres cellules en forme de fuseau *y*, *y* par l'intermédiaire de cordons déliés; des apophyses capillaires en partent pour descendre jusqu'à la *membrana basilaris* en *f*.

D'autres cellules analogues *m* se trouvent, mais non groupées deux à deux, de l'autre côté du point d'articulation et envoient des prolongements ramifiés et granuleux aux grosses cellules *b* dans la partie interne de la rampe moyenne. Un autre réseau de fibres de soutien (*fig.* 44, *o*) se trouve entre les articulations des arcs. On y reconnaît des fibres nerveuses, entremêlées, en forme de cordons perlés qui, passant à travers les trous *c*, déjà mentionnés de la *membrana basilaris*, entourent les arcs, et se disposent en petits faisceaux allongés, *g*, *h*, *i*, *k*. Dans la figure 44, on voit nettement ces faisceaux; dans la figure 43, ils ne paraissent que par leur section. Des cellules molles, appartenant probablement au système nerveux, se trouvent entre les articulations des arcs, et notamment aux deux points d'attache des arcs de Corti avec la *membrana basilaris*, dans les angles formés avec elle par les fibres de première et de seconde série.

On ne sait encore rien sur l'extrémité des fibres nerveuses, notam-

(1) Ces cellules portent, sur leur partie supérieure qui regarde la membrane de Corti, de petits crins semblables à ceux qui existent dans les ampoules (*fig.* 42). Chez les oiseaux, suivant Hasse, les arcs rigides de Corti font défaut dans le limaçon, et on n'y trouve que ces petits crins. Nous pouvons supposer avec quelque vraisemblance que ce sont des éléments doués d'une sensibilité particulière.

ment sur la question de savoir si, comme le supposait Kölliker, elles sont directement continuées par la substance des arcs de Corti. En tout cas, elles sont disposées de manière à être directement ébranlés par les organes de Corti, lorsque ceux-ci entrent en vibrations.

Pour résumer les résultats essentiels de notre description de l'oreille, nous avons trouvé que, partout, les extrémités des nerfs de l'audition sont reliées à des appareils auxiliaires particuliers, moitié durs, moitié élastiques, qui peuvent vibrer sous l'influence de vibrations extérieures, et, probablement alors, ébranler et exciter la masse nerveuse. On a déjà montré, dans le troisième chapitre, que le phénomène de la vibration par influence offre à l'observateur un caractère tout différent, selon que le corps vibrant, une fois ébranlé, résonne pendant longtemps, ou perd rapidement son mouvement. Les corps qui, une fois ébranlés, résonnent pendant longtemps, comme les diapasons, sont, à un haut degré, susceptibles de vibrer par influence, malgré le peu de mobilité de leur masse, parce qu'ils reçoivent une longue série de secousses, très-petites par elles-mêmes, que leur imprime chaque vibration du son excitateur, et conservent le mouvement. Mais, précisément à cause de cela, il doit y avoir l'unisson le plus parfait entre le son propre du diapason et le son excitateur, parce que, dans le cas contraire, les secousses produites par les vibrations ultérieures, ne peuvent pas coïncider régulièrement et sans interruption avec la même phase de la vibration, de manière à renforcer l'action des secousses précédentes. Si on prend, au contraire, des corps dont le son s'éteint rapidement, par exemple, des membranes tendues ou des cordes fines et légères, ils vibreront par influence si l'air vibrant a occasion d'agir sur eux, mais le phénomène ne sera pas circonscrit dans une limite sonore déterminée; ils vibreront facilement sous l'influence de sons assez divers. Car si un corps élastique, une fois ébranlé et résonnant librement, a à peu près perdu son mouvement au bout de dix vibrations, les nouvelles secousses qu'il reçoit au bout de ce temps peuvent agir même si elles ne sont pas exactement de concert avec les précédentes, condition indispensable pour un autre corps sonore, pour lequel le mouvement déterminé par la première secousse aurait à peine diminué au moment de l'arrivée de la seconde. Dans ce dernier cas, la seconde secousse ne peut accroître le mouvement, que si elle tombe exactement dans une phase de la vibration où sa direction coïncide avec le mouvement déjà existant.

On peut calculer la relation qui existe entre ces deux phénomènes tout à fait indépendamment de la nature du corps considéré, et, comme

la chose est importante pour l'appréciation des phénomènes qui se passent dans l'oreille, j'en ai donné ci-dessous un petit tableau. Qu'on imagine un corps vibrant avec l'intensité *maxima*, sous l'influence d'un son exactement à l'unisson avec lui; modifions ensuite le son excitateur, jusqu'à ce que l'intensité de la vibration d'influence soit réduite à 1/10 de sa valeur précédente. La grandeur de cette différence entre les sons est donnée dans la première colonne du tableau.

Qu'on ébranle ensuite le même corps sonore et qu'on le laisse résonner librement. Observons au bout de combien de vibrations l'intensité du son est réduite au $\frac{1}{10}$ de sa valeur primitive. Le nombre de ces vibrations est donné dans la seconde colonne :

	DIFFÉRENCE DE HAUTEUR par laquelle l'intensité de la vibration d'influence est réduite au 1/10.	NOMBRE DE VIBRATIONS au bout desquelles l'intensité du son est réduite au 1/10.
1.	1/8 de ton.	38,00
2.	1/4 —	19,00
3.	1/2 —	9,50
4.	3/4 —	6,33
5.	1 —	4,75
6.	5/4 —	3,80
7.	Tierce mineure (3/2 de ton).	3,17
8.	7/4 de ton.	2,71
9.	Tierce majeure (2 tons).	2,37

Bien que nous ne puissions pas déterminer exactement, pour l'oreille et ses parties, le temps au bout duquel elles cessent de vibrer, des expériences bien connues nous permettent d'apprécier à peu près dans quelle région de l'échelle de notre tableau, il faut placer les parties constitutives de l'organe de l'ouïe. Il ne peut naturellement y avoir, dans l'oreille, aucune partie qui résonne à peu près aussi longtemps qu'un diapason, car l'observation journalière aurait déjà permis de le constater. Même s'il y avait des parties correspondant seulement au premier échelon de notre tableau et réduisant au 1/10 leur intensité de vibration au bout de 38 vibrations, nous pourrions le reconnaître dans les régions graves.

En effet, 38 vibrations se font en 1/3 de seconde pour le la_0, en 1/6

(1) Le mode de calcul est exposé dans le supplément IX.

de seconde pour le la_1, en 1/12 pour le la_2, etc. Une durée aussi longue rendrait impossible tout mouvement rapide dans les octaves d'indices 1 et 2; l'effet musical serait alors aussi mauvais pour l'oreille qu'une forte résonnance dans un espace voûté, ou que le résultat obtenu en enlevant les étouffoirs du piano. Dans le trille, nous pouvons très-bien faire 8 ou 10 notes par seconde, de manière que chacun des deux sons soit émis 4 ou 5 fois. Si le premier son n'était pas, sinon éteint au moment de l'arrivée du second, du moins assez affaibli pour disparaître à côté de l'autre, les deux notes du trille ne pourraient sortir chacune distinctement, et on entendrait, d'une manière durable, un mélange des deux sons. Des trilles de ce genre, à 10 notes par seconde, sont d'une exécution nette et claire dans la plus grande partie de la gamme; au-dessous du la_0, cependant, dans la grande et la contre-octave, ils sonnent mal, durement, et les sons commencent à se mêler. On peut aussi prouver facilement que ce n'est pas la faute du mécanisme de l'instrument. Si, par exemple, on fait un trille sur l'harmonium, les touches des régions graves sont construites exactement de la même manière, leur mobilité est exactement la même que pour les régions aiguës. Chaque son est parfaitement déterminé et interrompu d'une manière complète, dès que la soupape retombe sur le canal à air; chacun d'eux commence exactement au moment où s'ouvre la soupape, parce que les anches continuent à vibrer pendant une si courte interruption. De même sur le violoncelle. Au moment où le doigt qui fait le trille se pose sur la corde, celle-ci prend une vibration d'une autre période correspondant à la longueur modifiée, et, au moment où le doigt s'éloigne, la vibration doit redevenir ce qu'elle était; cependant le trille dans le grave est plus mauvais sur le violoncelle que sur tout autre instrument. Sur le piano, les trilles et les traits dans le grave sont encore relativement bien meilleurs, parce qu'au moment de l'attaque, la nouvelle note sonne avec une grande intensité rapidement décroissante. Aussi, entend-on au moins chacune des deux notes sortir nettement du bruit faux que produit l'émission simultanée des deux sons. Comme la difficulté de faire un trille rapide dans le grave est la même pour tous les instruments de musique, et qu'elle est évidemment tout à fait indépendante du mode de production du son sur chaque instrument, nous devons en conclure que nous avons ici affaire à une difficulté qui réside dans l'oreille elle-même. C'est là un phénomène qui prouve nettement que les vibrations des parties mobiles de l'oreille pour les sons graves ne s'éteignent pas suffisamment, ni assez vite, pour permettre à deux sons de se succéder si rapidement sans se confondre.

Ce fait prouve, en outre, *qu'il doit y avoir dans l'oreille différentes*

parties qui sont mises en vibration par les sons de hauteurs différentes, et qui donnent la sensation de ces sons. On pourrait s'imaginer que la masse des éléments vibratiles de l'oreille, comprenant le tympan, les osselets et le liquide de l'oreille interne, peut vibrer et que c'est de la capacité de cette masse que dépend l'impossibilité pour les vibrations sonores de s'éteindre également vite dans l'oreille. Mais cette hypothèse ne suffirait pas pour expliquer les faits connus.

Quand, en effet, un corps élastique entre en vibrations sous l'influence d'un son extérieur, il prend le nombre de vibrations de ce dernier, mais dès que celui-ci cesse, il prend le nombre de vibrations qui lui est propre. Ce fait, qui est une conséquence de la théorie, peut se prouver très-nettement pour les diapasons au moyen du microscope à vibrations.

Si donc l'oreille vibre comme un système entier, et est susceptible notamment de prolonger ses vibrations, cette prolongation doit se faire suivant le nombre de ses vibrations propres, qui est tout à fait indépendant du nombre de vibrations du son extérieur, qui a pu déterminer le mouvement vibratoire. Il s'ensuivrait d'abord que les trilles seraient d'une exécution aussi difficile dans le haut que dans le bas, et, en second lieu, que les deux sons du trille se mêleraient non pas l'un à l'autre, mais à un troisième son propre à l'oreille elle-même. Nous avons appris à connaître un de ces sons dans le précédent chapitre, c'est le fa_5. Dans ces circonstances, par conséquent, le résultat serait tout autre que celui que nous fournit l'observation des faits.

Maintenant, si on exécute sur le *la* de 110 vibrations, un trille de 10 notes à la seconde, le même son reviendra toujours après 1/5 de seconde. Nous pouvons bien admettre que le trille ne serait pas net, si l'intensité du son qui s'éteint n'était pas réduite au moins à 1/10 au bout de 1/5 de seconde. Il s'ensuit qu'après 22 vibrations au moins, les parties de l'oreille vibrant pour le *la* ne vibreraient plus qu'avec le 1/10 de la force primitive, si on les abandonnait à elle-même, et que, par conséquent, leur faculté de vibrer par influence ne peut correspondre au premier, mais au second, au troisième degré de notre table ou à un degré encore plus élevé. Il ne peut pas être beaucoup plus élevé ; c'est ce qui résulte de ce que les trilles et les traits commencent déjà à devenir difficiles dans les régions un peu graves. Nous arriverons plus tard à la même conclusion par des observations sur les battements.

En somme nous pouvons admettre que la faculté d'étouffement des parties vibrantes de l'oreille correspond à peu près au troisième degré de notre table, où l'intensité de la vibration par influence, pour un écart

d'un demi-ton, est encore le 1/10 de celle correspondant à l'unisson absolu. Naturellement, il ne peut s'agir ici d'une détermination précise, mais c'est déjà important que de se faire une idée, au moins approximative, de la faculté d'étouffement des parties de l'oreille susceptibles de vibrer par influence. C'est d'une importance capitale pour le phénomène de la consonnance. Quand donc, dans la suite, nous dirons que chaque partie de l'oreille vibre sous l'influence d'un son déterminé, il faudra l'entendre en ce sens que le mouvement communiqué est le plus fort pour ce son-là, mais que les sons voisins agissent aussi à un degré moindre, de manière que pour une différence d'un demi-ton, la vibration par influence soit encore au moins appréciable.

Pour donner une idée de la loi suivant laquelle diminue l'intensité de la vibration d'influence, quand la différence de hauteur augmente, j'ai construit la figure ci-contre (*fig.* 45). La ligne horizontale *abc* représente une portion de l'échelle musicale, *ab* et *bc* désignent chacun l'étendue d'un ton entier. Soit un corps élastique accordé sur le son *b*, et soit *bd* le maximum de l'intensité correspondant à l'unisson absolu avec le son excitateur. La ligne de base de chaque ton entier est partagée en dixièmes, et les hauteurs correspondantes désignent l'intensité de la vibration du corps élastique pour un écart égal à la différence considérée du son excitateur avec l'unisson parfait.

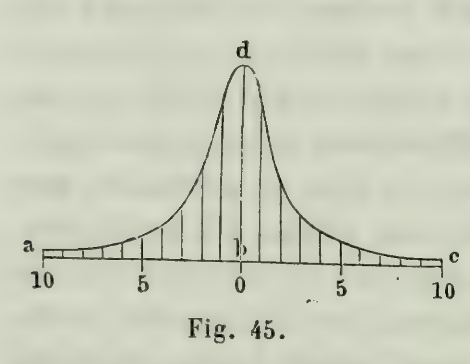


Fig. 45.

Je fais suivre ici les nombres au moyen desquels la figure 45 a été construite.

DIFFÉRENCE de hauteur.	INTENSITÉ de la vibration d'influence.
0,0	100
0,1	74
0,2	41
0,3	24
0,4	15
demi-ton	10
0,6	7,2
0,7	5,4
0,8	4,2
0,9	3,3
ton entier	2,7

On ne peut pas déterminer, d'une manière certaine, quelles sont les parties de l'oreille qui vibrent sous l'influence des différents sons.

Les otolithes, suspendus dans un liquide muqueux, sont à peine susceptibles de vibrer d'une manière particulièrement régulière, mais ils sont plutôt destinés à recevoir les secousses isolées et à les transmettre aux nerfs. Il en est encore de même, quoiqu'à un degré moindre, des petits crins situés dans les ampoules, parce que des corpuscules de si faible masse ne peuvent pas longtemps persister dans leur mouvement. D'après leur construction générale, ce sont plutôt les fibres de Corti, situées sur la cloison du limaçon, qui paraissent surtout de nature à exécuter par elles-mêmes des vibrations. Nous n'avons pourtant pas besoin de leur demander la faculté de vibrer longtemps sans que rien vienne entretenir le mouvement. Il est d'une importance capitale pour l'ouïe, que nous trouvions les nerfs munis d'appareils terminaux aussi différents. Des appendices élastiques, perdant rapidement leurs vibrations, seront relativement affectés par les secousses ou ondulations courtes du liquide du labyrinthe, plus que par les sons musicaux. Ils pourront, par conséquent, servir à percevoir les trépidations brusques et irrégulières, c'est-à-dire les bruits. Au contraire, des corps élastiques, prolongeant davantage leurs vibrations, seront beaucoup plus fortement ébranlés par un son musical de hauteur correspondante, que par les secousses isolées. Notre oreille peut percevoir les deux impressions, et nous pouvons bien supposer que cela tient à l'existence d'organes terminaux différents, en sorte que les épanouissements nerveux du vestibule et des ampoules serviraient à la perception des bruits, les fibres de Corti à la perception des sons. Nous pouvons admettre, en outre, que chacune de ces fibres est accordée dans un ton différent, et qu'elles forment une série régulière correspondant à la gamme musicale. D'après Kölliker, il y a environ 3000 fibres de Corti dans le limaçon de l'oreille humaine. Évaluons à 200 les sons situés en dehors des limites musicales, et dont la hauteur n'est qu'imparfaitement déterminée, il reste 2800 fibres pour les sept octaves des instruments de musique, c'est-à-dire 400 pour chaque octave, 33 $^1/_3$ pour chaque demi-ton, en tout cas, assez pour expliquer la distinction des fractions de demi-ton, dans la limite où elle est possible.

D'après les recherches de E. H. Weber, les musiciens exercés peuvent encore percevoir une différence de hauteur correspondant au rapport de vibrations 1000 à 1001. Ce serait environ 1/64 de demi-ton, valeur encore plus faible que celle correspondant à la distance des fibres de Corti. Mais il n'y a là rien qui vienne renverser notre hypothèse. Car s'il se produit un son dont la hauteur soit comprise entre celles de deux fibres de Corti voisines, il les fera vibrer toutes

deux par influence, mais celle dont le son propre est le plus voisin vibrera avec plus d'intensité. La faculté de distinguer encore de petites différences de hauteur dans l'intervalle de deux fibres, ne dépendra donc, en dernière analyse, que de la délicatesse avec laquelle on pourra comparer les intensités des excitations produites dans les deux fibres nerveuses correspondantes. On s'explique même ainsi que, le son extérieur montant d'une manière continue, notre sensation se modifie d'une manière également continue, et non par soubresauts, comme cela arriverait s'il n'y avait jamais qu'une fibre de Corti vibrant à la fois par influence.

Tirons les conséquences de notre hypothèse. Un son simple arrive-t-il à l'oreille, il ébranlera fortement les fibres de Corti qui sont exactement ou à peu près, à l'unisson avec lui ; toutes les autres ne seront que peu ou point ébranlées. Tout son simple d'une hauteur déterminée ne sera donc ressenti que par certaines fibres nerveuses, et des sons de hauteurs différentes exciteront des fibres différentes. S'il arrive à l'oreille un son complexe ou un accord, il affecte tous les prolongements élastiques correspondant aux divers sons simples contenus dans la masse sonore ; aussi, avec une attention bien dirigée, pourra-t-on percevoir toutes les sensations isolées correspondant aux divers sons simples. L'accord ou le son complexe devront donc être décomposés en leurs éléments constitutifs.

On expliquerait aussi de cette manière pourquoi l'oreille décompose les mouvements de l'air précisément en vibrations pendulaires. Chaque molécule d'air ne peut naturellement exécuter qu'un seul mouvement, à un instant donné. La théorie mathématique a considéré un mouvement de ce genre comme la somme de vibrations pendulaires; c'était d'abord une fiction arbitraire, pour la commodité de la théorie, sans signification dans la réalité. Nous avons rencontré d'abord une décomposition de ce genre, dans la théorie de la vibration par influence : un mouvement périodique non pendulaire peut faire résonner par influence des corps accordés en différents tons, correspondant aux harmoniques. Nous avons donc, grâce à notre hypothèse, ramené les phénomènes de l'ouïe à ceux de la vibration par influence, et nous trouvons là la cause qui fait qu'un mouvement périodique de l'air, simple dans son essence, produit une somme de sensations diverses et, par conséquent, apparaît comme complexe aux organes de la perception.

La sensation de sons de différentes hauteurs serait donc, d'après cela, une sensation éprouvée dans des fibres nerveuses différentes. La sensation du timbre proviendrait donc de ce qu'un son complexe, outre les fibres de Corti correspondant au son simple fondamental,

en mettrait encore un certain nombre d'autres en branle, et, par conséquent, déterminerait des sensations dans plusieurs groupes différents de fibres nerveuses.

Au point de vue physiologique, il faut encore remarquer ici que, par cette hypothèse, les qualités diverses de la sensation auditive, hauteur et timbre, sont ramenées à la différence des fibres mises en mouvement. C'est là un progrès du même genre, que celui qu'a réalisé, dans un domaine plus vaste, J. Müller, par sa théorie des énergies spécifiques des sens. Il a démontré que la diversité des sensations perçues par les différents sens ne dépend pas des agents extérieurs, producteurs de la sensation, mais des divers appareils nerveux destinés à la percevoir. Nous pouvons nous assurer par l'expérience, que le nerf optique et son prolongement, la rétine de l'œil, de quelque manière qu'ils soient excités, par la lumière, le picotement, la pression ou l'électricité, ne donnent jamais que la sensation de la lumière ; que les nerfs du toucher ne donneront que la sensation du toucher, jamais celle de la lumière, du son ou du goût. Les mêmes rayons du soleil perçus par l'œil comme lumière, sont perçus comme chaleur par les nerfs de la main ; les mêmes trépidations que la main perçoit comme un tremblement sont un son pour l'oreille.

De même que l'oreille perçoit les vibrations de durées différentes comme des sons de hauteurs différentes, de même aussi les vibrations de l'éther qui présentent des durées différentes, éveillent dans l'œil la sensation de couleurs distinctes ; les plus rapides correspondent au violet et au bleu, celles de vitesse moyenne au vert et au jaune, les plus lentes au rouge. Les lois du mélange des couleurs ont conduit Th. Young à supposer qu'il y a dans l'œil trois sortes de fibres nerveuses, correspondant à diverses espèces de sensations, savoir les fibres du rouge, du vert et du violet. En réalité, cette hypothèse donne une explication très-simple et parfaitement rigoureuse de tous les phénomènes visuels relatifs aux couleurs. Les différences qualitatives des sensations visuelles sont donc ainsi ramenées à la diversité des nerfs qui perçoivent ces sensations. Il ne reste alors, pour les sensations de chaque fibre nerveuse optique, prise isolément, que la différence quantitative correspondant à une excitation plus ou moins forte.

Il en est de même pour l'oreille, d'après l'hypothèse à laquelle nous conduisent nos recherches sur le timbre. Les différences de la qualité du son, c'est-à-dire la hauteur et le timbre, sont ramenées à la diversité des fibres nerveuses percevant la sensation, et, pour chaque fibre prise isolément, il ne reste que les différences provenant de l'intensité de l'excitation.

Les phénomènes d'excitation qui se produisent à l'intérieur des nerfs du mouvement, et qui leur font produire la contraction des muscles, ont été plus accessibles que ceux des nerfs de la sensation, aux recherches physiologiques. Nous n'y trouvons en réalité que les différences d'une excitation plus ou moins forte, mais point de différences qualitatives. Nous pouvons démontrer qu'à l'état d'excitation, les molécules de ces nerfs, agissant électriquement, éprouvent des modifications toujours les mêmes, quel qu'ait pu être le mode d'excitation. Une modification exactement la même se produit dans l'état d'excitation des nerfs de la sensation, quoique le résultat de l'excitation soit ici une sensation, et non un mouvement comme précédemment, et nous voyons par là que le mécanisme de l'excitation nerveuse doit être tout à fait le même dans les nerfs de la sensation et du mouvement. Grâce aux deux hypothèses dont il s'agit, les phénomènes nerveux des deux sens les plus relevés de l'homme, malgré la différence qualitative évidemment si grande des sensations, se ramènent au même schéma simple que nous connaissons pour les nerfs du mouvement. On a souvent comparé, et non sans raison, les nerfs aux fils télégraphiques. Un fil de ce genre ne conduit jamais que la même espèce de courant électrique, tantôt plus fort, tantôt moins fort, tantôt de sens opposés, mais ne présentant aucune différence qualitative. On peut cependant, selon les divers appareils mis en communication avec l'extrémité du fil, envoyer des télégrammes, faire sonner des cloches, faire sauter des mines, décomposer l'eau, faire mouvoir des aimants, magnétiser le fer, développer de la lumière, etc. De même pour les nerfs. L'état d'excitation qui peut être provoqué en eux, transmis par eux, autant qu'on peut le suivre sur les fibres isolées, est partout le même, mais selon les divers points, soit du cerveau, soit des autres parties du corps où aboutit cette excitation, elle produit les mouvements, les sécrétions dans les glandes, les augmentations ou les diminutions de la quantité de sang, la rougeur et la chaleur des différents organes, les sensations lumineuses et auditives. Si, qualitativement, l'effet produit diffère dans les divers organes auxquels aboutissent des fibres nerveuses d'une nature particulière, le phénomène de l'excitation est partout le même dans les fibres isolées, comme le courant électrique qui traverse les fils est toujours le même, malgré la diversité des effets produits à leur extrémité. Au contraire, tant que nous admettons que la même fibre transmet des sensations différentes, il faut y supposer aussi des modes différents d'excitation, ce qu'on n'a pu encore y trouver jusqu'ici.

Sous ce rapport, l'hypothèse ici mise en avant, aussi bien que celle de Young sur la différence des couleurs, a une importance

encore plus grande pour la physiologie du système nerveux en général.

Depuis la première édition de ce livre, la théorie des sensations auditives qui précède a été confirmée d'une manière intéressante par les observations et les expériences de V. Hensen (1) sur les organes de l'ouïe chez les crustacés. Ces animaux ont de petits sacs moitié fermés, moitié ouverts à l'extérieur, où les otolithes nagent librement dans une humeur aqueuse, et qui sont surmontés de petits crins rigides particuliers, reliés par leurs extrémités aux otolithes, formant une série ordonnée par ordre de grandeur, passant de crins plus grands et plus gros à de plus petits et de plus minces. On trouve aussi, chez beaucoup de crabes, de petits crins tout à fait analogues sur les parties libres du corps, et qui doivent être considérés comme les organes de l'ouïe. Ce qui le prouve, pour des crins extérieurs, c'est en partie l'analogie de leur construction avec les crins des otolithes, en partie la circonstance qu'ils se relient aux nerfs de la même manière, et partent de la même souche, que dans les sacs des otolithes. Enfin, Hensen a trouvé que l'ouïe persistait après l'extirpation des sacs des otolithes dans le Mysis, l'animal ne conservant que les crins extérieurs des antennes.

Au moyen d'un appareil reproduisant les dispositions du tympan et des osselets, Hensen conduisait le son d'un cor à piston, dans l'eau d'une petite caisse où était fixé un Mysis, en sorte qu'on pouvait observer au microscope les crins extérieurs de la queue. On constatait ainsi que certains sons du cor faisaient vibrer fortement certains crins; d'autres sons ébranlaient d'autres crins. Chaque crin répondait à plusieurs notes du cor, et on peut, au moyen des notes émises, reconnaître approximativement la série des harmoniques d'un seul et même son. Les résultats ne pouvaient être entièrement purs par l'effet de la résonnance de l'appareil de transmission.

Ainsi un de ces crins répondait fortement au *ré*$\sharp_1$ et au *ré*$\sharp_2$, plus faiblement au *sol*$_1$, très-peu au *sol*$_0$, ce qui fait supposer qu'il était accordé entre le *ré*$_3$ et le *ré*$\sharp_3$. Car alors il correspondrait au second son partiel de *ré*$_2$—*ré*$\sharp_2$, au troisième, de *sol*$_1$ — *sol*$\sharp_1$, au quatrième, de *ré*$_1$ — *ré*$\sharp_1$ et au sixième de *sol* — *sol*$\sharp$. Un autre crin répondait fortement au *la*$\sharp_1$ et aux sons voisins, plus faiblement au *ré*$\sharp_1$ et au *la*$\sharp_2$. Le son propre était apparemment un *la*$\sharp_0$.

(1) *Études sur l'organe de l'ouïe chez les décapodes*, tirées du *Journal de zoologie scientifique* de Siebold et Kölliker, Bd. XIII.

Ces observations prouvent directement pour les crustacés dont il s'agit, l'existence de phénomènes tels que nous les avons supposés dans le limaçon humain ; c'est d'autant plus important, que la position cachée et la grande fragilité des organes considérés, nous laissent peu de chances d'arriver à prouver, d'une manière aussi directe, que les éléments de l'oreille sont accordés chacun à des hauteurs différentes.

DEUXIÈME PARTIE

DES SONS SIMULTANÉS

CONSONNANCE ET DISSONNANCE.

CHAPITRE VII

DES SONS RÉSULTANTS.

Dans la première partie de ce livre on a posé et invoqué constamment la loi suivante : le mouvement vibratoire de l'air ou des autres corps élastiques, déterminé par l'action simultanée de deux sources sonores, est toujours exactement égal à la somme des mouvements que produirait chaque source sonore si elle était seule. Cette loi est d'une importance tout à fait capitale en acoustique ; elle permet, en effet, de ramener les mouvements composés aux mouvements simples ; mais il faut remarquer qu'elle n'est applicable, dans toute sa rigueur, que lorsque les vibrations sont *infiniment petites* en tous les points de l'air ambiant et des corps élastiques producteurs du son, c'est-à-dire lorsque les variations locales de densité sont assez faibles, pour ne pouvoir entrer en comparaison avec la densité normale du corps élastique, et que, par suite, les déplacements des molécules vibrantes sont négligeables, comparés aux dimensions de la masse élastique. Dans les applications pratiques, à la vérité, les vibrations sont presque toujours *très-petites* et assez voisines de l'*infiniment petit*, pour que la loi demeure applicable, avec une grande approximation, aux vibrations des sons réellement musicaux, et pour que, dans la majeure partie des phénomènes, l'observation soit d'accord avec cette loi. Il existe cependant certains phénomènes provenant de ce que la loi, exacte pour les vibrations *infiniment petites*, ne s'applique pas tout à fait exactement aux vibrations qui ne sont que *très-petites* (1). Du nombre de ces phénomènes se trouvent les *sons résultants*, qui vont appeler ici notre attention. Sorge, organiste allemand, les découvrit le premier en 1740 ; plus tard le violoniste italien Tartini les fit connaître d'une manière plus générale, mais avec quelques erreurs partielles sur leur hauteur ; on les appelle souvent, de son nom, *sons de Tartini*.

On entend ces *sons résultants*, lorsque deux sons musicaux de différente hauteur sont émis simultanément avec force, et se prolongent avec régularité. La hauteur du son résultant diffère, en général,

(1) Voir le supplément X à la fin du volume.

aussi bien de celle des sons primaires que de celle de leurs harmoniques. Dans les expériences, on les distingue facilement de ces derniers ; en effet, les sons résultants font défaut, si l'un des sons primaires est émis seul, et se produisent aussitôt que les deux sons primaires sont donnés simultanément.

Les sons résultants se divisent en deux classes. Les premiers découverts par Sorge et par Tartini, que j'ai proposé d'appeler *sons différentiels*, sont caractérisés par ce fait qu'ils présentent des vibrations en nombre égal à la différence des nombres de vibrations des sons primaires ; les seconds, dits sons *additionnels*, ont été découverts par moi ; leur nombre de vibrations est égal à la somme des nombres correspondants des sons primaires.

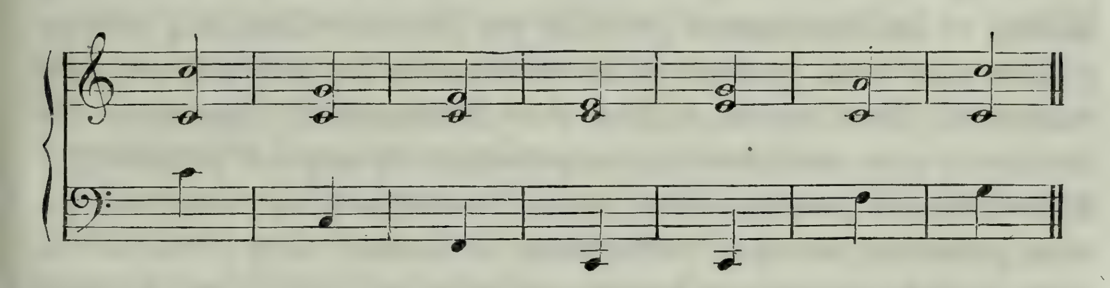
Quand on cherche les sons résultants de deux sons composés, les sons fondamentaux aussi bien que les harmoniques peuvent donner des sons additionnels ou différentiels. Le nombre des sons résultants est alors très-considérable. Il faut remarquer cependant, qu'en général, les sons différentiels sont plus forts que les sons additionnels; les sons simples primaires les plus forts donnent aussi les sons résultants les plus intenses. L'intensité des sons résultants croît même dans une proportion beaucoup plus forte, et diminue plus rapidement que celle des sons primaires simples. Comme l'intensité du son fondamental dépasse de beaucoup celle des harmoniques, ce sont en général les sons résultants des sons fondamentaux, et particulièrement les sons différentiels, qui arrivent à l'oreille plus forts que les autres, et qui, par suite, ont été découverts en premier lieu.

Le moyen le plus facile d'arriver à les entendre consiste à choisir les deux sons primaires distants de moins d'une octave ; le son différentiel des sons fondamentaux est alors plus bas que chacun des sons primaires. Pour l'entendre, on choisit deux sons susceptibles d'être émis avec intensité et d'une manière prolongée, formant un intervalle harmonique juste, et de moins d'une octave. On émet d'abord le plus grave, puis le plus élevé. Avec une attention convenablement dirigée, on remarquera qu'au moment où la note aiguë se produit, on entend un son plus grave et plus faible, qui est précisément le son résultant cherché. Sur quelques instruments, par exemple sur l'harmonium, on peut rendre sensibles les sons résultants au moyen de résonnateurs convenablement choisis. Ici le phénomène se produit déjà dans l'air renfermé dans l'instrument. Mais, dans d'autres cas, où les sons résultants ne se produisent que dans l'oreille, les résonnateurs n'ont que peu ou point d'utilité.

La table suivante donne les premiers sons différentiels des intervalles consonnants usuels :

INTERVALLES.	RAPPORTS DE VIBRATIONS.	DIFFÉRENCES	LE SON RÉSULTANT EST PLUS GRAVE QUE LE PLUS BAS des sons primaires D'UN INTERVALLE ÉGAL à
Octave...........	1 : 2	1	l'unisson.
Quinte...........	2 : 3	1	l'octave.
Quarte...........	3 : 4	1	la douzième.
Tierce majeure....	4 : 5	1	la 2e octave.
Tierce mineure....	5 : 6	1	la 2e octave, plus la tierce majeure.
Sixte majeure.....	3 : 5	2	la quinte.
Sixte mineure.....	5 : 8	3	la sixte majeure.

ou en notation usuelle, en figurant les sons primaires par des blanches et les sons résultants par des noires :



Quand on s'est exercé à entendre les sons résultants d'intervalles justes et de sons tenus, on apprend aussi à reconnaître ceux existant dans les intervalles dissonnants et dans les sons peu prolongés du piano. Ceux produits par les intervalles dissonnants se reconnaissent plus difficilement, parce qu'ils sont mêlés à des battements plus ou moins forts dont nous expliquerons plus tard l'origine. Les sons résultants de notes de courte durée, comme celles du piano, ne présentent que dans les premiers moments une intensité suffisante pour se faire entendre, et s'éteignent encore plus rapidement que les sons primaires. Aussi, en général, est-il plus facile de percevoir les sons résultants dans les sons simples des tuyaux d'orgue fermés ou des diapasons, que dans les sons complexes qui comprennent déjà une foule d'autres éléments sonores. Ces derniers donnent lieu, comme on l'a déjà vu, à un grand nombre de sons différentiels formés par les harmoniques, et qui détournent facilement l'attention du son différentiel des sons fondamentaux. On entend fréquemment ces sons résultants des harmoniques, surtout sur le violon et l'harmonium.

Exemple : Prenons la tierce majeure ut_2, mi_2 rapport des nombres 4 : 5. Le premier différentiel est 1, c'est-à-dire ut_1. Le premier har-

monique de ut_2 est ut_3 avec le nombre de vibrations 8. Il donne avec mi_2 la différence 3, c'est-à-dire sol_1. Le premier harmonique de mi_2 est mi_3 avec le nombre 10, qui donne avec ut_2 ou 4, la différence 6, c'est-à-dire sol_2. De même ut_3 et mi_3 donnent le son résultant 2 ou ut_1. Nous obtenons donc ainsi, au moyen des premiers harmoniques, la série des sons résultants 1, 3, 6, 2, ou ut_1, sol_1, sol_2, ut_2. C'est surtout le son 3 ou sol_1 qui est souvent le plus facile à saisir.

Ces combinaisons multipliées ne sont ordinairement appréciables que quand les sons composés primaires contiennent des harmoniques facilement perceptibles. Cependant on ne peut pas prétendre que les sons résultants (autres que ceux formés par les sons fondamentaux), manquent complétement là où les harmoniques font défaut ; seulement ils sont alors assez faibles pour que l'oreille n'arrive pas facilement à les distinguer à côté des sons primaires plus intenses et du premier son différentiel. La théorie démontre qu'ils sont alors assez faibles, et les battements produits par les intervalles faux, dont on parlera plus tard, permettent de reconnaître l'existence de ces sons résultants. Dans ces cas, on peut avec Hallstroem (1), considérer ces nombreux sons résultants comme provenant de ce que le premier son différentiel du premier ordre donne lui-même à son tour avec les sons primaires des sons différentiels du second ordre ; ceux-ci en donnent de nouveaux avec les sons primaires et ceux du second ordre, et ainsi de suite.

Exemple : Supposons encore deux sons simples dans le rapport de 4 à 5, par exemple, ut_2 et mi_2 ; le différentiel du premier ordre est 1 ou ut_1. Il donne avec les sons primaires 4 et 5, les différentiels du second ordre 3 et 4, sol_1 et un second ut_2. Le nouveau son 3 donne avec 4 et 5 les sons du troisième ordre 1 et 2, ut_1 et ut_2, avec le son du premier ordre 1, le différentiel du quatrième ordre 2, c'est-à-dire un second ut_1, etc... Les sons de différents ordres et de même hauteur, dans cet exemple, ne coïncident parfaitement que dans l'hypothèse d'une justesse absolue ; ils ne coïncident pas, au contraire, d'une manière complète, si l'intervalle primaire n'est pas tout à fait juste ; il se produit alors des battements provoqués par la présence de ces sons. On en parlera avec plus de détails dans la suite.

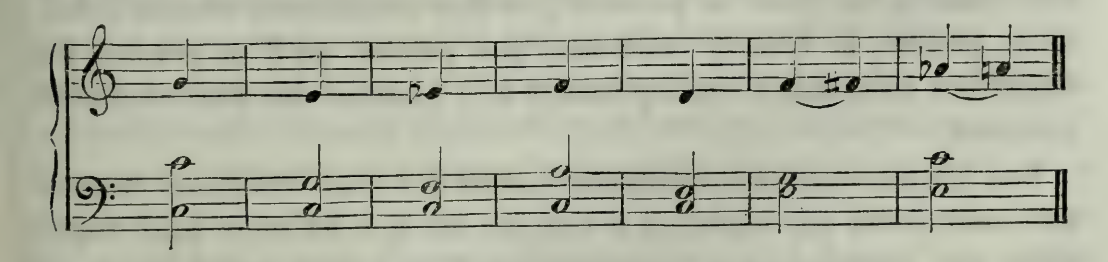
Je fais suivre ci-dessous les systèmes des différentiels des différents ordres pour les divers intervalles. Les sons primaires sont figurés par des blanches, les sons résultants du premier ordre par des noires, du deuxième ordre par des croches, etc. Dans les sons composés, les mêmes notes se produisent comme sons résultants des harmoniques.

(1) *Annales de Poggendorff*, vol. XXIV, p. 438.



Les séries s'interrompent aussitôt que le dernier ordre ne fournit plus de nouveaux sons. Ce tableau prouve d'une manière générale, que la série des harmoniques 1, 2, 3, 4, 5, etc., s'établit d'une manière complète jusqu'au son primaire supérieur.

Les sons résultants de la seconde espèce, ceux que j'ai appelés sons additionnels, ont, en général, une intensité beaucoup moins grande que les sons différentiels, et ne s'entendent facilement que dans des circonstances particulièrement favorables, surtout sur l'harmonium et la sirène polyphone. On ne peut même guère percevoir que ceux dont les nombres de vibrations sont égaux à la somme des nombres de vibrations des sons primaires. Il peut naturellement exister aussi des sons additionnels formés par les harmoniques. Le nombre de vibrations étant toujours égal à la somme des nombres correspondants des sons primaires, les additionnels sont toujours plus élevés que ces derniers. Pour les intervalles simples, ils se présentent dans l'ordre suivant :



Pour les deux derniers intervalles, les sons additionnels sont situés en réalité entre les deux notes figurées à la clef de *sol*. Au point de vue musical, je dois faire remarquer ici que beaucoup de ces additionnels forment avec les sons primaires des intervalles très-discordants. S'ils n'étaient pas très-faibles sur la plupart des instruments,

ils donneraient des dissonnances extrêmement dures. En réalité, sur la sirène polyphone où tous les sons résultants se produisent avec une surprenante intensité, les tierces majeure et mineure et la sixte mineure sont très-désagréables à l'oreille, tandis que l'octave, la quinte et la sixte majeure résonnent fort agréablement; sur la sirène, la quarte ne fait que l'impression d'un accord de septième médiocrement bon.

On a considéré autrefois les sons résultants comme purement subjectifs, et on croyait qu'ils prenaient naissance dans l'oreille elle-même. On ne connaissait que les sons différentiels, et on les rangeait dans la même catégorie que les battements, qui se produisent lorsque deux sons de hauteurs peu différentes résonnent simultanément. (Nous étudierons ce phénomène de plus près dans le prochain chapitre.) On pensait qu'avec des battements suffisamment rapides, les renforcements successifs pouvaient donner la sensation d'un nouveau son, d'un nombre de vibrations égal au nombre de battements, comme pourraient le faire de nombreuses secousses imprimées à l'air. Mais, en premier lieu, cette considération n'explique que la production des différentiels, et non pas celle des additionnels ; en second lieu, on peut prouver que les sons résultants ont une existence objective, indépendamment de l'oreille qui, dans cette hypothèse, devrait composer avec les battements un nouveau son ; en troisième lieu, enfin, ce point de vue ne peut s'accorder avec la loi établie par toutes les autres expériences, et qui consiste en ce que l'oreille ne peut percevoir que les sons simples correspondant à des mouvements simples, pendulaires, de l'air ambiant.

En réalité, on peut assigner à la production des sons résultants, une autre cause qui a été déjà indiquée plus haut d'une manière générale. Si, par exemple, l'air ou tout autre corps élastique, mis en mouvement par les deux sons primaires simultanés, entre en vibrations assez fortes pour ne pouvoir plus être considérées comme infiniment petites, la théorie mathématique prouve qu'il se produit des vibrations en nombre correspondant à la hauteur des sons résultants observés.

Des instruments isolés peuvent fournir des sons résultants particulièrement forts. La condition à remplir est que les deux sons impriment des ébranlements considérables à la même *masse d'air*. Le phénomène se produit le mieux sur la sirène polyphone, où le même disque tournant contient deux ou plusieurs séries de trous, qui peuvent recevoir en même temps le vent d'une même soufflerie (1).

(1) Cet instrument sera décrit plus complétement dans le prochain chapitre.

La densité de l'air renfermé dans la caisse à vent augmente toutes les fois que les trous sont fermés ; quand ils s'ouvrent, il s'échappe une portion considérable de la masse gazeuse, ce qui détermine une notable diminution de pression. L'air de la caisse à vent, et même du soufflet, exécute alors de fortes vibrations, comme on peut le sentir facilement au toucher. Si deux séries de trous reçoivent le vent, il se produit dans la masse d'air du réservoir, des vibrations analogues correspondant aux deux sons ; chaque fois que les trous d'une série sont ouverts, il s'en échappe un courant d'air, mais non pas un courant régulier dans son écoulement ; l'air qui le forme est déjà mis en vibrations par l'autre son. Dans ces circonstances, les sons résultants se produisent avec une intensité extraordinaire, presque aussi forte que celle des sons primaires. Leur existence objective peut se prouver au moyen de membranes vibrantes, à l'unisson avec les sons résultants que l'on veut produire. Elles vibrent par influence toutes les fois que les deux sons primaires résonnent simultanément, mais non quand l'un ou l'autre est émis seul. Dans ce cas, les sons résultants sont assez forts pour rendre les accords très-désagréables, surtout s'il y entre des tierces ou des sixtes mineures. Au lieu des membranes, il est plus commode d'employer les résonnateurs que j'ai recommandés plus haut pour l'étude des harmoniques. Or, ceux-ci ne peuvent renforcer qu'un son correspondant à des vibrations pendulaires se produisant dans l'air, et non pas un son qui n'existerait qu'à l'état de sensation auditive. On peut donc employer les résonnateurs à prouver l'existence objective des sons résultants. Ils sont beaucoup plus sensibles que les membranes, et susceptibles de mettre en évidence des sons même très-faibles.

Sur l'harmonium, les choses se passent de la même manière que sur la sirène. Ici encore c'est une masse d'air qui est en jeu ; et, en frappant deux touches, nous avons deux orifices que les anches ouvrent et ferment périodiquement. L'air est fortement agité par les deux sons dans le réservoir commun, et, par chaque ouverture, il s'introduit une masse gazeuse déjà mise en vibrations par l'autre anche. Aussi, sur cet instrument, les sons résultants se présentent-ils objectivement, et avec une intensité relativement très-notable ; mais ils ne sont pas à beaucoup près aussi forts que sur la sirène ; cela tient à ce que la caisse à vent est très-grande par rapport aux orifices, d'où il résulte qu'à chaque passage du vent sur l'anche vibrante, il ne sort pas assez d'air pour diminuer la pression d'une manière notable. Sur l'harmonium, on entend, très-renforcés par des résonnateurs convenablement accordés, les divers sons résultants, surtout le premier et le second différentiel, et le premier additionnel. Je me suis cependant assuré par

des expériences spéciales, que, sur l'instrument en question, l'intensité du son résultant se produit pour la plus grande partie dans l'oreille. J'ai modifié l'action du vent sur l'instrument de la manière suivante : l'un des sons recevait l'air du soufflet inférieur, mis en mouvement avec le pied ; pour l'autre son, on commençait par remplir d'air le réservoir, puis on le fermait au moyen du registre de l'expression ; les sons résultants ainsi obtenus n'étaient pas beaucoup plus faibles qu'à l'ordinaire. Mais la portion objective, celle susceptible d'être renforcée par les résonnateurs, est alors beaucoup plus faible. Au moyen des considérations précédentes, on pourra facilement trouver les touches qu'il faut frapper pour obtenir un son résultant susceptible d'être renforcé par un tube résonnant donné.

En revanche, si les centres d'ébranlement correspondant aux deux sons se trouvent absolument séparés, et n'ont aucune communication mécanique, si, par exemple, le son est émis par deux voix, par deux instruments à vent, par deux violons, l'action renforçante des tubes résonnants sur les sons résultants est faible et même douteuse.

On ne peut donc ici démontrer d'une manière évidente, la présence dans l'atmosphère d'une vibration pendulaire correspondant au son résultant ; et nous devons conclure que les sons résultants qui présentent quelquefois une notable intensité, prennent alors naissance dans l'oreille. Mais, par analogie avec les cas précédents, nous devons admettre que ce sont d'abord les parties vibrantes extérieures de l'oreille, surtout le tympan et les osselets qui exécutent une vibration combinée suffisamment forte pour produire le son résultant ; les vibrations correspondant aux sons résultants peuvent donc, en réalité, exister objectivement dans l'oreille sans exister objectivement dans l'air. Si le résonnateur convenable peut encore, dans ce cas, renforcer un peu le son résultant, cela vient de ce que la membrane du tympan transmet à la masse gazeuse du résonnateur les vibrations qui correspondent au son résultant.

Nous exposerons plus tard le rôle important des sons résultants dans la formation des accords. Mais, avant d'en arriver là, nous avons à étudier un second phénomène dû à la coexistence de deux sons ; nous voulons parler des *battements*.

CHAPITRE VIII

BATTEMENTS DES SONS SIMPLES.

Nous arrivons maintenant à d'autres phénomènes dus à l'émission simultanée de deux sons ; dans ces phénomènes, les mouvements de l'air ou des autres corps élastiques entrant en jeu, soit au dedans, soit en dehors de l'oreille, peuvent être considérés absolument comme une simple juxtaposition, sans action réciproque, des deux systèmes vibratoires correspondant aux deux sons, mais la sensation auditive n'est plus la somme des deux sensations correspondant aux deux sons isolés. Les sons résultants se distinguent essentiellement des battements dont nous allons nous occuper, en ce que, pour les premiers, la somme des vibrations des corps élastiques, intérieurs ou extérieurs à l'oreille, subit des altérations, tandis que l'oreille décompose en sons simples, d'après la loi ordinaire, le mouvement aérien définitif qui arrive jusqu'à elle. Dans les battements, au contraire, les mouvements objectifs des corps élastiques suivent la loi simple, mais il ne se produit pas une addition pure et simple des sensations. Tant qu'il arrive à l'oreille plusieurs sons dont les hauteurs sont suffisamment différentes, les sensations auditives correspondantes peuvent se juxtaposer sans aucune action réciproque ; ici, selon toute vraisemblance, ce sont des fibres nerveuses tout à fait différentes qui sont ébranlées. Des sons de même hauteur, au contraire, ou de hauteurs presque égales, et qui viennent ébranler les mêmes fibres nerveuses, ne donnent pas simplement la somme des sensations que chaque son produirait agissant seul ; il se présente encore de nouveaux phénomènes d'un ordre particulier, qu'on appelle *interférences* quand il s'agit de deux sons *identiques*, et *battements*, quand il s'agit de deux sons *presque* identiques.

Nous allons décrire d'abord les phénomènes d'interférence. Imaginons un point quelconque dans l'air ou dans l'oreille, mis en mouvement par une source sonore ; le mouvement est figuré par la courbe 1 (*fig*. 46). Supposons le mouvement qui émane de la seconde source sonore, exactement le même que le précédent à chaque instant, et figuré par la courbe 2 ; de telle sorte, que les éminences et les dépressions se correspondent respectivement dans les deux courbes. Si les

deux sons se produisent simultanément, le mouvement résultant sera la somme des deux autres, et pourra être représenté de la même manière par la courbe 3 ; mais les éminences et les dépressions y sont

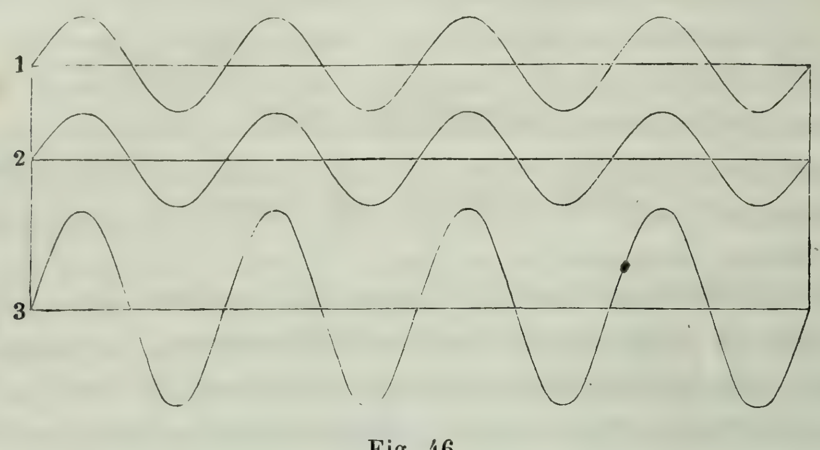


Fig. 46.

respectivement doubles des éléments correspondants des courbes génératrices. Comme l'intensité du son est proportionnelle au carré de l'amplitude de la vibration, nous obtenons un son d'une intensité, non pas double, mais quadruple.

Qu'on suppose maintenant les vibrations de la seconde source sonore, déplacées de la longueur correspondant à une demi-durée de vibration ; les mouvements vibratoires à composer seront figurés par les courbes 4 et 5 de la figure 47 ; si on les compose, les hauteurs,

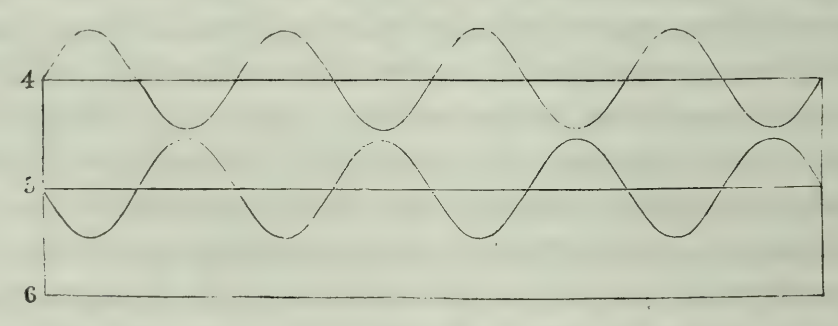


Fig. 47.

étant partout égales, mais de signes contraires, se détruiront réciproquement, et leur somme, égale à zéro, sera représentée par la ligne droite 6. Ici les éminences de 4 s'ajoutent aux dépressions de 5, les annulent, et *vice versâ*. L'intensité du son sera donc nulle ; si une pareille combinaison de mouvements se produit à l'intérieur de l'oreille, la sensation cesse, et, tandis que les sources sonores agissant seules produisent des sensations auditives équivalentes, leur action simultanée ne donne lieu à aucune sensation. Deux sons égaux se détruisent mutuellement dans ce cas d'une manière complète. C'est là

un fait qui semble d'abord paradoxal, et entièrement contraire à ce qui se voit ordinairement, car, dans la manière naturelle d'envisager le son, on le considère, non pas comme un mouvement des molécules aériennes, mais comme quelque chose de réel, analogue à la sensation même du son. Comme les sensations de deux sons de même hauteur n'offrent point les apparences contraires du positif et du négatif, il paraît naturellement impossible qu'une des deux puisse détruire l'autre. Mais ce sont ici les secousses imprimées aux organes auditifs par les deux sources sonores, qui se détruisent mutuellement. L'ébranlement d'une des sources coïncide avec l'ébranlement en sens contraire dû à l'autre source ; s'ils sont exactement égaux, il ne peut se produire dans l'oreille aucun mouvement, et le nerf auditif n'éprouve aucune sensation.

Je vais donner ici quelques exemples où le son est ainsi détruit par le son.

1. — Supposons deux tuyaux d'orgue exactement semblables, accordés à l'unisson, et montés sur le même sommier, tout près l'un de l'autre. Chacun d'eux, isolément frappé par l'air, donne un son intense ; mais si on fait arriver le vent dans les deux à la fois, le mouvement de l'air est modifié de telle sorte, que le courant entre dans un des tuyaux pendant qu'il sort de l'autre ; aussi n'arrive-t-il à l'oreille d'un observateur éloigné aucun son ; on ne peut entendre alors que le frôlement de l'air. Si, maintenant, on place une barbe de plume près de l'embouchure du tuyau, elle exécute les mêmes vibrations que si chaque tuyau résonnait seul. Si on place un tube, allant de l'oreille à l'un des orifices, le son qui en émane se trouve renforcé de telle sorte, qu'il ne peut plus être complétement éteint par le son de l'autre tuyau.

Le diapason présente également des phénomènes d'interférences, qui viennent de ce que les deux branches exécutent leurs mouvements en sens contraires. Si l'on frappe un diapason, qu'on l'approche de l'oreille et qu'on le fasse tourner autour de son axe, on trouve quatre régions où l'on entend distinctement le son ; dans les quatre régions intermédiaires, le son devient inappréciable. Les quatre premières sont celles où l'une des deux branches, ou bien l'un des deux plans latéraux du diapason viennent faire face à l'oreille. Les autres sont placées dans des positions intermédiaires, à peu près dans des plans menés par l'axe du diapason, à 45° sur les plans des branches. Dans la figure 48, *a* et *b* représentent les extrémités du diapason, vues d'en haut ; *c*, *d*, *e* et *f* sont les régions où le son est intense, les lignes ponctuées désignent les régions muettes. Les flèches indiquent le sens du mouvement simultané dans les deux branches. Par conséquent,

tandis que la branche a imprime une secousse à la masse d'air voisine c, dans le sens ca, b agit en sens inverse. Les deux impulsions ne se détruisent que partiellement en c, parce que a agit avec plus d'intensité que b. Les lignes ponctuées, au contraire, désignent les régions où les impulsions en sens contraires de a et de b ont la même intensité, et s'annulent par conséquent d'une manière complète. Si l'on place l'oreille aux différents points où l'on n'entend rien, et si on promène un petit tube étroit sur l'une ou l'autre des branches a ou b, avec la précaution de ne pas toucher les branches vibrantes, le son devient aussitôt plus fort; l'influence de la branche couverte par le tube est presque entièrement annulée, et l'autre branche peut alors agir seule sans que rien vienne troubler son action.

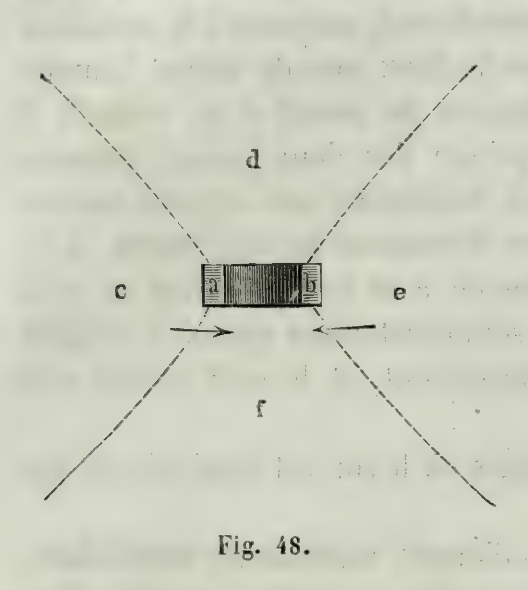


Fig. 48.

Il est très-commode pour la démonstration de ces propriétés, de faire usage de la sirène double que j'ai fait construire (1). La figure 49 en donne une vue perspective. Elle se compose de deux sirènes polyphones de Dove, telles qu'on les a déjà décrites plus haut; a_0 et a_1 sont les deux caisses à vent, c_0 et c_1 les disques fixés sur un même axe b, qui porte une vis k sur laquelle on peut monter un compteur; la disposition de ce dernier a été déjà décrite plus haut, p. 17. La caisse supérieure a_1 peut elle-même tourner autour de son axe. A son extrémité, elle présente une roue dentée qui engrène avec une autre plus petite e munie d'une manivelle d. L'axe autour duquel tourne la caisse a_1 est un prolongement du conduit supérieur de l'air g_1. Chacun des deux disques présente quatre séries de trous qui peuvent recevoir l'air, soit isolément, soit simultanément. En i, sont les boutons qui ouvrent les séries de trous au moyen d'un mécanisme particulier (2). Le disque inférieur présente quatre séries de 8, 10, 12, 18 trous, le disque supérieur quatre autres de 9, 12, 15, 16. Nommons ut_0, le son de huit trous; le disque inférieur donne ut_0, mi_0, sol_1, $ré_1$, le disque supérieur $ré_0$, sol_0, si_0, ut_1. On peut ainsi produire les intervalles suivants :

1. Unisson : sol_0, sol_0 sur les deux disques à la fois.

(1) Par le mécanicien Sauerwald, de Berlin.
(2) Décrit dans le supplément XI.

2. Octave : ut_0, ut_1 et $ré_0$, $ré_1$ sur les deux.

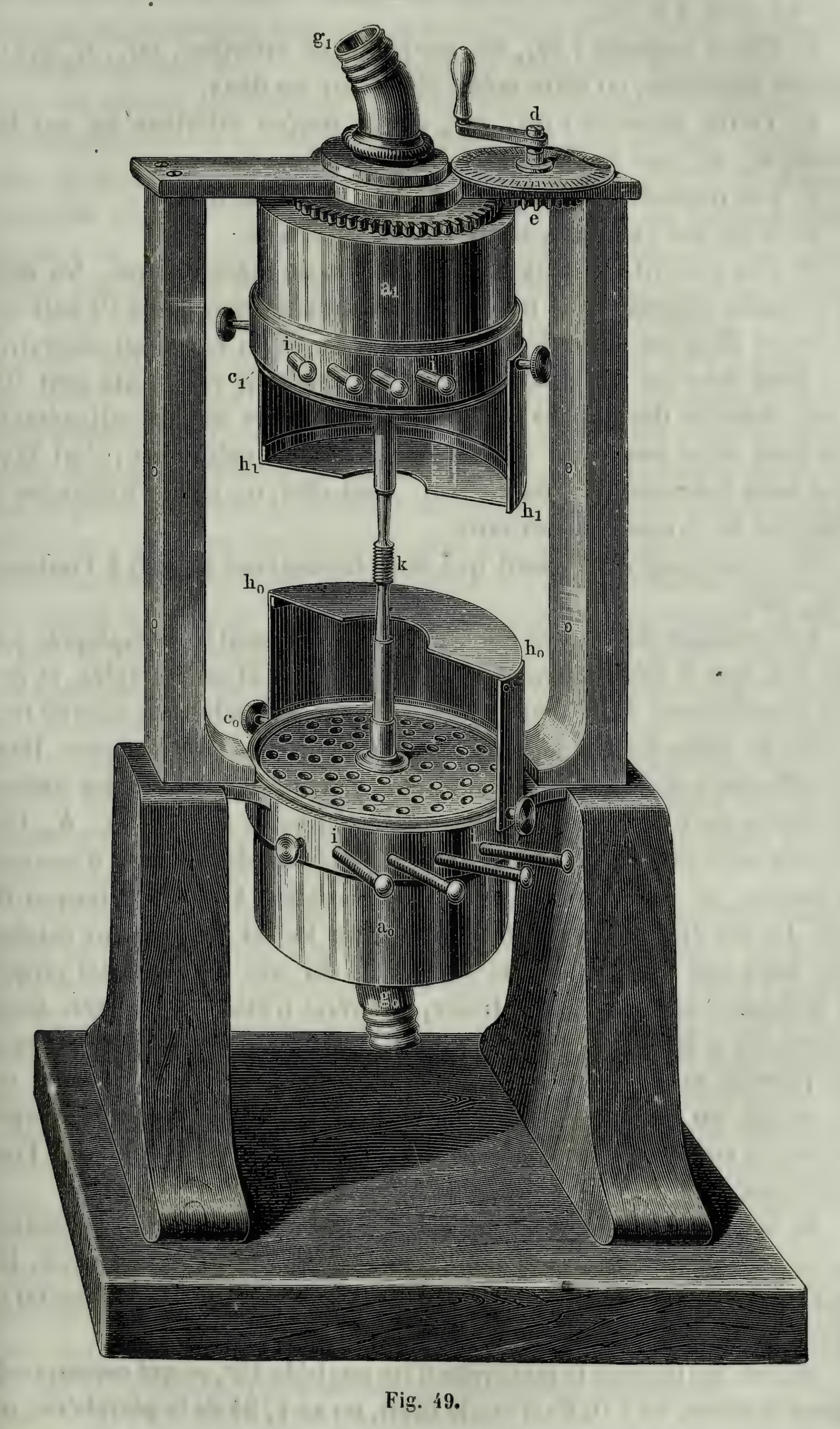


Fig. 49.

3. Quintes, ut_0, sol_0 et sol_0, $ré_1$ sur le disque inférieur seul ou sur les deux à la fois.

4. Quartes : $ré_0$, sol_0 et sol_0, ut_1, sur le disque supérieur seul ou sur les deux à la fois.

5. Tierce majeure : ut_0, mi_0 sur le disque inférieur, sol_0, si_0 sur le disque supérieur, ou cette même tierce sur les deux.

6. Tierce mineure : mi_0, sol_0 sur le disque inférieur ou sur les deux, si_1, $ré_1$, sur les deux.

7. Ton majeur : ut_0, $ré_0$, et ut_1, $ré_1$, sur les deux.

8. Demi-ton : si_0, ut_1, sur le disque supérieur.

Si l'on produit les deux sons au moyen du même disque, les sons résultants objectifs ont une grande intensité, comme on l'a déjà remarqué dans les précédents paragraphes. Si on émet, au contraire, les deux sons sur des disques différents, les sons résultants sont faibles ; dans ce dernier cas, il est possible de faire agir simultanément les deux sons avec une différence de phase quelconque ; c'est là ce qui nous intéresse en premier lieu. A cet effet, on n'a qu'à changer la position de la caisse supérieure.

Ne nous occupons d'abord que des phénomènes relatifs à l'unisson sol_0, sol_0.

Les résultats de l'interférence des deux sons sont ici compliqués par ce fait, que la sirène donne des sons composés et non simples, et que les interférences des harmoniques isolés ne dépendent en aucune manière de celles du son fondamental ou des autres harmoniques. Pour étouffer les harmoniques de la sirène, j'ai fait construire des caisses de laiton dont on voit les moitiés postérieures en h_1, h_1 et h_0, h_0. Ces caisses sont partagées chacune en deux moitiés, de manière à pouvoir s'enlever, se remettre et se fixer sur la caisse à vent au moyen de vis. Le son émis par la sirène sera plein, fort et harmonieux comme un beau son de cor, s'il se rapproche du son fondamental propre à la caisse ; dans le cas contraire, la sirène n'émet qu'un son assez aigre. On a besoin de peu d'air, mais d'une forte pression. Les choses se passent exactement ici comme pour une languette, à laquelle on a adapté un tuyau sonore accordé à la même hauteur. Employée ainsi, la sirène est très-commode pour étudier le phénomène de l'interférence.

Si les deux caisses sont disposées de manière que les secousses aériennes aient lieu exactement en même temps des deux côtés, les mêmes phases se produisent en même temps pour le fondamental et pour les harmoniques ; ils seront tous renforcés.

Si l'on fait tourner la manivelle d'un angle de 45°, ce qui correspond, pour la caisse, au 1/6 d'un angle droit, ou au 1/24 de la périphérie, ou enfin à une demi-distance de la série de 12 trous mise en jeu, les deux sons fondamentaux présentent une différence de phase d'une demi-

durée de vibration, les secousses aériennes d'une des caisses se produisent exactement au milieu de la période qui sépare celles de l'autre caisse, et les deux sons fondamentaux se détruisent réciproquement. Mais les octaves supérieures, dans ces circonstances, présentent une différence de phase égale à la durée d'une vibration entière ; par suite, elles se renforcent mutuellement dans cette position, et il en est de même de tous les harmoniques pairs, tandis que les harmoniques impairs se neutralisent. Dans cette position, le son est donc plus faible, parce qu'un certain nombre d'éléments sonores lui sont retirés ; il ne s'éteint pas tout à fait cependant, mais il monte plutôt à l'octave. Tournons la manivelle d'un second angle de 45° ; la rotation totale est d'un angle droit ; les secousses aériennes des deux disques coïncident alors de nouveau, et les sons se renforcent. Pour un tour entier de la manivelle, on trouve donc quatre positions où le son de la sirène paraît renforcé dans toutes ses parties, et quatre autres, intermédiaires, où le son fondamental ainsi que tous les harmoniques impairs disparaissent, et où, par conséquent, l'intensité totale, résultant seulement de l'octave supérieure et des harmoniques pairs, est plus faible. Si l'on ne considère que le premier harmonique, l'octave du son fondamental, on trouve, en écoutant au moyen de tubes résonnants convenables, que cette octave s'affaiblit pour une rotation de 1/4 d'angle droit, et se renforce de nouveau pour une rotation de 1/2 droit; pour un tour complet, elle s'éteint donc 8 fois et se renforce 8 fois. Le troisième son partiel, la douzième, s'éteint 12 fois dans le même temps, le quatrième 16 fois, etc.

L'interférence se produit encore dans des conditions analogues à celles de la sirène, par l'émission simultanée de deux sons composés de la même espèce, présentant une différence de phase égale à la durée d'une demi-vibration ; le son ne s'éteint pas, mais il passe à l'octave. Si on prend, par exemple, deux tuyaux ouverts ou deux tuyaux à anche de même structure, de même hauteur, montés l'un à côté de l'autre sur le même sommier, leurs vibrations respectives se disposent ordinairement de manière que le courant d'air entre alternativement dans l'un et dans l'autre tuyau ; dans ces conditions-là, pour des tuyaux fermés qui ne présentent que des harmoniques impairs, le son s'éteindrait presque complétement; pour les tuyaux ouverts ou à anche, au contraire, l'octave supérieure est renforcée. C'est ce qui fait que, sur l'orgue ou l'harmonium, on ne peut pas arriver à renforcer un son en combinant des anches ou des tuyaux identiques.

Jusqu'ici, nous avons fait agir simultanément deux sons de hauteurs exactement égales; cherchons maintenant ce qui va se produire

par l'émission simultanée de deux sons dont les hauteurs présentent quelque différence. La sirène double, précédemment décrite, est encore d'un grand secours pour étudier ce nouveau cas. Nous pouvons changer un peu la hauteur du son émis par la caisse à vent supérieure, en faisant tourner celle-ci lentement au moyen de la manivelle; le son sera plus grave, si la caisse tourne dans le même sens que le disque, et plus aigu, si on la fait tourner en sens contraire. La durée de vibration du son de la sirène est égale, en effet, au temps que met un trou du disque tournant à aller d'un trou de la caisse à vent au trou suivant. Si le trou de la caisse vient, par la rotation, au-devant du trou du disque, les deux trous coïncideront plus tôt que si la caisse à vent restait immobile; la durée de vibration est plus courte, le son plus aigu. Le contraire se produit par une rotation de la caisse à vent en sens inverse. On entend très-facilement le son monter ou descendre quand on tourne un peu plus vite. Supposons maintenant, que, sur les deux disques, on fasse arriver l'air dans la série de douze trous; les sons produits seront exactement à l'unisson, tant que la caisse supérieure de la sirène demeurera immobile. Les deux sons se renforcent ou s'affaiblissent réciproquement d'une manière constante, d'après la position de la caisse supérieure. Qu'on imprime maintenant à cette dernière une rotation lente, on fait varier ainsi, comme nous venons de le voir, la hauteur du son supérieur, tandis que le son inférieur, dont la caisse n'est pas mobile, demeure invariable. Nous faisons donc ainsi résonner simultanément deux sons différant un peu l'un de l'autre. Nous entendons alors ce qu'on appelle des *battements* du son, c'est-à-dire que l'intensité présente des renforcements et des affaiblissements, se succédant alternativement et d'une manière régulière. D'après la disposition de notre sirène, il est facile d'en trouver la cause. Par son mouvement de rotation, la caisse supérieure arrive successivement dans les positions correspondant, comme nous l'avons vu, à des sons forts et à des sons faibles. Si l'on tourne la manivelle d'un angle droit, la caisse à vent va de la position d'un son fort à la position suivante, correspondant également à un son fort, en passant par la position d'un son faible. Nous trouvons ainsi quatre battements pour chaque tour entier de la manivelle, quelles que soient la vitesse de rotation des disques et la gravité ou l'acuïté du son émis. En arrêtant la caisse au moment d'un maximum d'intensité, on obtient la grande intensité sonore d'une manière durable; en s'arrêtant, au contraire, au moment d'un minimum, on obtient le son faible.

Le mécanisme de l'instrument donne ici, en même temps, des indications sur la relation qui existe entre le nombre des battements et la différence des hauteurs. On voit facilement, à la réflexion, que le

nombre des secousses aériennes est diminué de un, pendant que la manivelle tourne d'un angle droit. A chaque rotation d'un angle droit, exécutée par la manivelle, correspond un battement. *Le nombre des battements, dans un temps donné, se trouve donc égal à la différence entre les nombres de vibrations exécutées pendant le même temps par les deux sons considérés.* C'est là la loi générale qui détermine le nombre des battements pour les sons de toute espèce. Mais on ne peut en contrôler l'exactitude, sur les autres instruments, que par des mesures très-précises et très-pénibles des nombres de vibrations, tandis que, sur la sirène, la loi résulte immédiatement de la construction même de l'instrument.

Le phénomène est représenté graphiquement dans la figure 50, pour

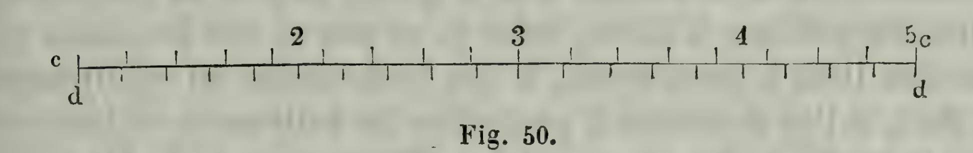


Fig. 50.

le cas le plus simple. Soit *cc*, la série des secousses aériennes de l'un des sons, *dd*, celle correspondant à l'autre. La ligne *cc* est partagée en 18 parties, la ligne *dd*, égale, en 20 parties. Les secousses aériennes des deux sons coïncident aux points 1, 3, 5, nous avons un renforcement du son ; aux points 2 et 4, l'une des divisions tombe au milieu de l'autre, et les vibrations qu'elles représentent s'affaiblissent réciproquement. La ligne entière présente deux battements, nombre égal à la différence du nombre des divisions qui représentent chacune une vibration (1).

On appelle *coups*, les *maxima* de l'intensité sonore pendant les battements ; ils sont séparés par un nombre plus ou moins grand de silences complets.

Il est facile de produire des battements sur tous les instruments en émettant des sons peu différents l'un de l'autre. Ils se produisent bien surtout au moyen des sons simples des diapasons ou des tuyaux fermés, parce qu'ici le son s'éteint complétement, en réalité, par intervalles.

Dans les sons complexes des autres instruments, les harmoniques apparaissent au moment où les sons fondamentaux cessent de résonner, et, par suite, le son reprend à l'octave, comme on l'a déjà décrit dans le cas de l'interférence sonore. Si l'on a deux diapasons accordés à l'unisson, on n'a qu'à coller un peu de cire à l'extrémité de l'un d'eux, à les ébranler simultanément, et à les approcher de la même oreille

(1) Voir le Supplément XII.

ou à les mettre sur le bois d'une table ordinaire, d'une table d'harmonie, etc... Pour déterminer des battements dans deux tuyaux fermés, à l'unisson, il suffit d'approcher le doigt de l'embouchure de l'un d'eux, ce qui fait descendre un peu le son. On entend de même les battements de sons composés, en frappant chacune des touches d'un piano faux, quand les deux cordes correspondant à la même note ne sont pas exactement à l'unisson; si le piano est juste, on n'a qu'à coller sur l'une des deux cordes de la note considérée un petit morceau de cire de la grosseur d'un pois. On altère ainsi suffisamment la justesse. Mais, avec les deux sons complexes qu'on obtient de cette manière, il faut déjà un peu plus d'attention, car l'affaiblissement du son n'est plus aussi frappant. Le battement apparaît plutôt ici comme une modification de la hauteur et de la qualité du son. Le phénomène est très-frappant sur la sirène, selon qu'on met ou non les caisses résonnantes. Dans le premier cas, le son fondamental est relativement fort. Puis, si l'on détermine la production des battements en tournant la manivelle, les renforcements et les affaiblissements de l'intensité sont très-sensibles. Si l'on enlève, au contraire, les caisses résonnantes, les harmoniques atteignent une intensité relativement grande, et, comme l'oreille ne peut apprécier que d'une manière très-incertaine les différences d'intensité de deux sons de différentes hauteurs, la variation de l'intensité, pendant le battement, est beaucoup moins saisissante que celle de la hauteur ou du timbre.

Quand deux sons complexes exécutent des battements, les harmoniques en donnent également; à chaque battement du son fondamental, correspondent deux battements du second son élémentaire, trois du troisième, etc. Pour des harmoniques d'une certaine intensité, il serait donc facile de se tromper en comptant les battements, surtout si les coups du son fondamental sont très-lents et séparés par des silences d'une ou deux secondes. Si, dans ces conditions-là, on veut bien apprécier la hauteur des sons qui battent, il est nécessaire de recourir à des résonnateurs.

On peut rendre les battements visibles à l'œil en faisant vibrer sous leur influence un corps d'une élasticité convenable. Naturellement, les battements ne peuvent déterminer cette vibration que si les deux sons qui les produisent sont chacun assez voisins du son fondamental propre au corps élastique, pour pouvoir séparément le faire vibrer. Ce qu'il y a de mieux, c'est de prendre une corde mince, tendue sur une table d'harmonie, sur laquelle on place deux diapasons accordés presque à l'unisson l'un de l'autre, ainsi que de la corde elle-même. En observant les vibrations de la corde au moyen d'un microscope, ou en y adaptant un petit faisceau de plumes d'oie, dont l'extrémité

exécute les mêmes vibrations amplifiées, on voit clairement la corde exécuter par influence des vibrations d'amplitude alternativement grande ou petite, selon que le son des deux diapasons atteint son maximum ou son minimum d'intensité.

On peut arriver au même résultat, en faisant vibrer par influence une membrane tendue. La figure 51 est la copie d'un dessin exécuté

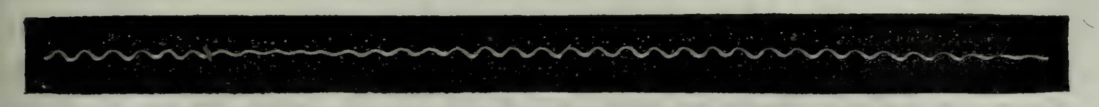


Fig. 51.

par une membrane de ce genre, au moyen du phonautographe de MM. Scott et König de Paris. Sur cet instrument, la membrane analogue à celle du tympan, porte une petite tige rigide qui dessine les vibrations sur un cylindre tournant. La membrane était mise en mouvement par deux tuyaux d'orgue donnant des battements. La ligne d'onde, dont nous ne reproduisons ici qu'une faible portion, montre comment les instants correspondant aux fortes vibrations alternent avec ceux où la membrane est presque au repos. Les battements sont ainsi indiqués par la membrane elle-même. Enfin M. Politzer a obtenu des dessins semblables en adaptant directement le style traçant sur l'osselet (*la columella*) d'un canard, et en faisant résonner deux tuyaux d'orgue battant ensemble ; on prouve ainsi que les osselets eux-mêmes suivent les battements de deux sons (1).

En général, ce résultat doit toujours se produire quand les hauteurs des deux sons émis diffèrent assez peu l'une de l'autre, et s'écartent assez peu de celle du son propre au corps élastique, pour que celui-ci puisse vibrer d'une manière appréciable sous l'influence simultanée des deux sons. Lorsque ce corps exécute des vibrations qui s'éteignent lentement, comme les diapasons, il faut deux sons extraordinairement voisins pour déterminer des battements visibles ; ceux-ci doivent alors être très-lents ; pour les corps dont les vibrations s'éteignent plus vite, comme les membranes, les cordes, etc., la différence des sons excitateurs peut être plus grande, et, par conséquent, les battements eux-mêmes peuvent se suivre à intervalles plus rapprochés.

La même chose a lieu pour les extrémités élastiques des fibres ner-

(1) On peut aussi très-bien rendre les battements visibles en faisant usage de flammes vibrantes associées à un résonnateur, et en émettant deux sons dont les hauteurs, un peu différentes entre elles, s'écartent un peu de celle du résonnateur. Les variations de la forme de la flamme, qui se produisent dans le rhythme des battements, mettent ces derniers en évidence, sans qu'il y ait besoin de recourir à un miroir tournant.

veuses de l'audition. Nous venons de voir que les osselets peuvent exécuter des battements visibles ; de même, les fibres de Corti peuvent donner des battements, toutes les fois qu'on émet deux sons assez voisins l'un de l'autre pour pouvoir simultanément faire vibrer par influence les mêmes fibres. Si donc, comme nous l'avons supposé précédemment, l'intensité de la sensation dans les fibres nerveuses correspondantes croît et décroît avec l'intensité des vibrations élastiques, les sensations doivent présenter des intensités croissant ou diminuant dans le même rapport que les vibrations du prolongement nerveux considérés. Dans ce cas aussi, le mouvement des fibres de Corti devrait encore être considéré comme composé des deux mouvements, qu'auraient produits sur elles les deux sons agissant séparément. Selon que ces mouvements sont de même sens ou de sens contraires, ils se renforceront ou s'affaibliront réciproquement en s'ajoutant. Si donc ces vibrations modifiées excitent des sensations dans les nerfs, c'est une exception à la loi d'après laquelle deux sons ou deux sensations acoustiques peuvent coexister sans agir réciproquement l'un sur l'autre.

Nous arrivons maintenant à une partie de nos recherches qui intéresse à un haut degré la théorie des consonnances musicales, et qui, malheureusement, n'a fixé que très-peu, jusqu'ici, l'attention des acousticiens. Il s'agit de la question de savoir ce que deviennent les battements, lorsqu'on les fait se succéder à des intervalles de plus en plus rapprochés, et jusqu'où peut croître leur nombre sans dépasser les limites au delà desquelles l'oreille ne peut plus les percevoir. Jusqu'à présent, la plupart des acousticiens admettaient volontiers l'hypothèse de Thomas Young, d'après laquelle les battements se produisant avec une grande vitesse devaient se transformer en son résultant (le premier différentiel). Young supposait, que les secousses sonores qui se produisent pendant les battements, pouvaient avoir sur l'oreille le même effet que les secousses aériennes élémentaires, de la sirène, par exemple ; de même que 30 secousses aériennes, se produisant en une seconde sur cet instrument, donnent la sensation d'un son grave, de même, d'après Young, 30 battements de deux sons aigus quelconques donneraient la sensation d'un son plus grave. Une circonstance vient à l'appui de cette hypothèse ; c'est que, par le fait, le nombre des vibrations du premier et du plus fort des sons résultants, est égal au nombre de battements que peuvent donner les deux sons considérés. Mais, ce qui est ici d'une grande importance, il y a d'autres sons résultants, en particulier ceux que j'ai appelés additionnels, qui ne peuvent en aucune manière rentrer dans cette explication, et qui, au contraire, peuvent facilement se déduire

de la théorie que j'ai donnée des sons résultants. Il y a encore à opposer à l'hypothèse de Young que, dans beaucoup de cas, les sons résultants prennent naissance en dehors de l'oreille, et peuvent faire vibrer par influence des membranes ou des sphères résonnantes convenablement accordées, ce qui ne pourrait arriver si les sons résultants n'étaient autre chose que la série des battements produits par la superposition de deux ondes sonores sans action réciproque. La théorie mécanique de l'influence nous fait voir, qu'un mouvement aérien, composé de deux vibrations de périodes différentes, ne peut jamais faire vibrer par influence que les corps dont le son propre correspond à l'un des deux sons émis, à moins de certaines circonstances qui altèrent la simple superposition des deux systèmes d'ondes, et dont nous avons expliqué la nature dans le précédent chapitre. Nous pouvons donc considérer les sons résultants comme un phénomène accessoire, qui n'altère pas essentiellement la marche des deux systèmes d'ondes primaires, et de leurs battements.

Nous pouvons encore invoquer contre l'ancienne hypothèse, l'observation des sensations, qui nous apprend qu'on peut entendre d'une manière encore précise plus de 30 battements par seconde. Pour arriver à ce résultat, il suffit de passer successivement de battements lents à des battements plus rapides, en ayant soin que les deux sons excitateurs ne soient pas trop éloignés l'un de l'autre dans la gamme ; l'oreille ne peut, en effet, percevoir les battements, qu'autant que les deux sons se trouvent assez voisins l'un de l'autre, pour pouvoir faire vibrer par influence les mêmes prolongements nerveux élastiques. Mais on peut augmenter le nombre des battements, sans agrandir l'intervalle des deux sons, en prenant ces derniers dans les octaves supérieures.

Ce qu'il y a de mieux, c'est de commencer les observations en produisant deux sons simples de même hauteur, choisis par exemple dans l'octave d'indice 2, au moyen de diapasons ou de tuyaux fermés placés l'un à côté de l'autre, et de modifier lentement le ton de l'un de ces derniers. A cet effet, il suffit de coller des quantités croissantes de cire aux branches de l'un des diapasons ; pour les tuyaux d'orgue, on peut faire lentement baisser l'un d'eux, en fermant de plus en plus son embouchure ; au reste, la plupart des tuyaux bouchés sont munis, à leur extrémité fermée, d'un obturateur ou couvercle mobile qui sert à régler le trou : on peut l'enfoncer plus profondément, ce qui élève le son, ou la retirer, ce qui rend le son plus grave.

En déterminant de cette manière une petite différence entre les sons, on entend les battements se produire, tant que les deux ondes sonores continuent à se superposer et à s'éteindre alternativement.

Des battements lents de ce genre produisent sur l'oreille une impression qui n'est pas du tout désagréable ; ils peuvent même, dans un morceau formé d'accords prolongés, avoir quelque chose de très-solennel, ou même donner à l'expression quelque chose d'animé, de frémissant, d'ému en quelque sorte. Aussi trouve-t-on sur les nouvelles orgues et sur l'harmonium, un registre formé par des anches et des tuyaux qui donnent des battements. On imite ainsi le *tremblé* de la voix humaine et des instruments à archet, tremblé qui, bien employé dans certains passages, peut être très-expressif et exercer une grande action, mais qui n'en est pas moins une détestable habitude, lorsqu'il est employé d'une manière continue, ce qui se voit malheureusement assez souvent.

L'oreille suit facilement ces battements lents, quand il n'y en a pas plus de 4 ou 6 à la seconde. L'auditeur a le temps d'en saisir toutes les phases, d'avoir conscience de chacune d'elles ; il peut compter les battements sans difficulté. Mais si la différence des deux sons vient à croître, si elle atteint, par exemple, un demi-ton, le nombre des battements s'élève à 20 ou 30 par seconde, et, naturellement, il n'est plus possible de les suivre isolément de l'oreille, ni de les compter. Si cependant on commence par écouter de lentes secousses sonores, puis qu'on les fasse se succéder de plus en plus vite, on reconnaît que l'impression produite sur le sens de l'ouïe est toujours la même ; on a toujours la sensation d'une série de secousses sonores distinctes, quoique, naturellement, pour 20 ou 30 secousses par seconde, on n'ait plus le temps de fixer son attention sur chacune d'elles et de lui assigner un numéro d'ordre.

Mais si, dans un cas semblable, l'auditeur peut encore très-bien reconnaître que son oreille entend maintenant 30 secousses sonores, de la même manière qu'elle en entendait précédemment 4 ou 6 par seconde, le caractère général de l'impression produite par des battements aussi rapides est tout autre. D'abord, la masse sonore devient confuse, ce que j'attribuerais plutôt à une cause psychique. Nous entendons une série de secousses sonores, nous pouvons reconnaître que cette série existe, mais nous ne pouvons plus ni suivre chacune des secousses ni la distinguer de la suivante. En dehors de ces raisons plutôt psychologiques, l'impression directement produite sur les sens devient désagréable. Un son composé battant aussi vite est roulant et dur. Il est facile de s'expliquer le roulement, car ce qui caractérise les sons roulants, c'est d'être intermittents. Nous considérons la lettre R comme l'exemple caractéristique des sons roulants. On la produit, comme on sait, en interposant sur le passage du courant d'air, soit le voile du palais, soit la partie antérieure et pointue de la langue ; l'air

ne peut se frayer un passage que par secousses isolées, et, par suite, le son qui l'accompagne, tantôt s'échappe librement, tantôt est interrompu.

J'ai pu aussi produire des sons intermittents au moyen de la sirène double précédemment décrite, en mettant à la place du porte-vent de la caisse supérieure, un petit tuyau à anche, à travers lequel je faisais passer l'air. On ne peut en entendre le son que lorsque, par la rotation, les trous du disque coïncident avec ceux de la caisse et donnent passage à l'air. En faisant tourner le disque, pendant que l'air traverse le tuyau à anche, on obtient donc un son intermittent produisant exactement le même effet qu'un son composé à battements rapides, quoique les intermittences soient obtenues par un moyen purement mécanique. On peut encore y arriver d'une autre manière au moyen de la même sirène. Pour cela, j'enlève la caisse à vent inférieure, et je ne laisse que son couvercle percé de trous, sur lequel se déplace le disque tournant. J'adapte à l'une des ouvertures de ce couvercle un des bouts d'un tube en caoutchouc, dont l'autre extrémité communique au moyen d'un tube convenablement disposé, avec l'oreille de l'observateur. Le disque, en tournant, viendra successivement fermer et ouvrir l'orifice auquel est adapté le tube de caoutchouc. Si on place dans le voisinage et au-dessus du disque tournant un diapason ou un autre instrument, on entend le son d'une manière intermittente, et, en faisant tourner le disque de la sirène plus ou moins vite, on peut régler à volonté le nombre des intermittences.

On peut donc obtenir des sons intermittents de deux manières. Dans le premier cas, le son du petit tuyau à anche est intermittent dans l'atmosphère même, parce qu'il ne peut arriver que d'une manière discontinue ; le son intermittent peut donc être entendu par un nombre quelconque d'auditeurs. Dans le second cas, le son est continu dans l'atmosphère, mais arrive d'une manière discontinue à l'oreille de l'observateur, qui entend à travers la sirène. Il ne peut donc être entendu que par un seul observateur, mais on peut facilement faire l'expérience sur toute espèce de sons de hauteurs ou de timbres les plus divers. Tous, rendus intermittents, donnent exactement le même genre de dureté que présentent deux sons simultanés dont les battements sont rapides. On voit ainsi bien clairement, que les battements et les intermittences sont identiques en ce sens que, parvenus à un certain nombre, ils donnent lieu à l'espèce de bruit qu'on appelle roulement.

Les battements déterminent une excitation intermittente dans certains nerfs auditifs. Comment une semblable excitation intermittente agit-elle beaucoup plus désagréablement qu'une autre forte, ou

même plus forte, mais continue, c'est ce qu'on peut expliquer par analogie avec ce qui se passe dans les autres nerfs du corps humain. Chaque excitation énergique d'un nerf en affaiblit en même temps l'excitabilité, de telle sorte qu'une nouvelle action de la cause excitante, se produisant à la suite de la précédente, trouve le nerf moins sensible qu'auparavant. Par contre, dès que l'excitation cesse, et que le nerf est abandonné à lui-même, l'irritabilité revient aussitôt dans le corps vivant, sous l'influence du sang artériel. Les différents organes du corps paraissent se lasser et réparer leurs forces, avec une rapidité différente, mais nous trouvons ces deux éléments (la fatigue et le repos), partout où les muscles et les nerfs exercent leurs actions. Parmi les organes où ces modifications se produisent relativement vite, se trouve l'œil qui présente, d'ailleurs, la plus grande analogie avec l'oreille. Nous n'avons qu'à regarder le soleil pendant un temps à peine appréciable, pour trouver que la partie du tissu nerveux ou de la rétine de l'œil, qui a été touchée par la lumière solaire, est devenue moins sensible à toute autre lumière. Nous voyons, en effet, immédiatement une tache obscure de la grandeur de l'image du soleil, si nous regardons une surface d'un éclat régulier, par exemple, la voûte céleste ; ou bien encore plusieurs taches de ce genre, entre-croisées de lignes, si le regard, au lieu de fixer le soleil, s'est déplacé de côté et d'autre. Un clin d'œil suffit pour produire cette action, et l'étincelle électrique, qui dure un temps inappréciable, produit une fatigue du même genre.

Si nous regardons d'une manière continue une surface lumineuse avec un œil non fatigué, l'impression atteint son maximum dans le premier moment, puis elle décroît en même temps que la sensibilité de l'œil, et s'affaiblit de plus en plus tant que l'œil est attaché sur la surface. En passant de l'obscurité à la pleine lumière du jour, on est aveuglé ; mais après quelques minutes, quand la sensibilité de l'œil est émoussée par l'excitation lumineuse, ou bien, comme on dit aussi, quand l'œil s'est *habitué* à cette excitation, cette clarté paraît très-agréable. Inversement, quand on passe de la pleine lumière à un endroit obscur, on est insensible à la faible lumière qui y domine, et on ne peut trouver son chemin ; au bout de quelques minutes, quand l'œil s'est reposé de la forte lumière, on commence à voir très-bien dans l'espace obscur.

Dans l'œil, les phénomènes de ce genre sont très-faciles à étudier, parce qu'on peut fatiguer certains points du fond de l'œil, laisser les autres au repos, et comparer les sensations obtenues dans les deux cas. Qu'on place un petit morceau de papier noir sur un papier blanc

modérément éclairé ; qu'on fixe pendant un instant un point déterminé sur le papier noir ou à côté, puis, qu'on ôte brusquement ce dernier, on verra ce qu'on appelle une *image accidentelle* du noir, qui consiste en ce que toute la place où se trouvait le noir, est maintenant d'un blanc plus clair que le reste du papier. C'est que la partie de l'œil, où se peignait le noir, est reposée, en comparaison des points précédemment touchés par l'image du blanc ; avec la partie reposée, nous voyons donc le blanc dans toute sa clarté primitive, tandis qu'aux points de la rétine déjà un peu fatigués par son action, il apparaît comme sensiblement gris.

En se prolongeant d'une manière régulière, l'excitation lumineuse elle-même produit un affaiblissement de la sensibilité, ce qui protége l'organe contre les effets d'une excitation trop vive et trop prolongée.

Les choses se passent d'une tout autre manière, si l'on fait agir sur l'œil une lumière intermittente, des éclairs, par exemple, séparés par des pauses. Pendant les pauses, la sensibilité reprend un peu de sa valeur première, et la nouvelle excitation agit avec beaucoup plus d'intensité qu'elle ne l'aurait pu faire si elle avait présenté la même force, mais en agissant d'une manière continue. Chacun sait quelle impression désagréable et pénible produit une lumière papillotante, même si elle est relativement très-faible, comme la lumière vacillante d'une petite bougie.

Il en est de même pour les nerfs du toucher. La peau est beaucoup plus sensible au frottement répété de l'ongle, qu'au contact prolongé du même ongle appuyant avec la même pression. La sensation désagréable provoquée par le frottement, le chatouillement, etc., provient de l'excitation intermittente des nerfs du toucher.

Un son roulant, intermittent, produit le même effet sur les nerfs de l'ouïe, que la lumière vacillante sur les nerfs de la vue, et le frottement sur la peau. Aussi détermine-t-il, dans l'organe, une sensation beaucoup plus intense et plus désagréable qu'un son régulièrement prolongé. On le reconnaît surtout en écoutant des sons intermittents très-faibles. Si l'on place un diapason vibrant assez loin de l'oreille pour qu'on cesse de l'entendre, on arrivera à percevoir encore le son, en tournant plusieurs fois entre les doigts la tige du diapason. Ce dernier occupe ainsi successivement les positions d'où le son peut parvenir à l'oreille, et celles dans lesquelles il ne se produit aucune sensation auditive ; ces alternances dans l'intensité rendent le son perceptible. Aussi le moyen le plus sensible de constater l'existence d'un son très-faible, consiste-t-il à émettre un son ayant presque la même intensité, qui fasse avec le premier deux ou quatre battements

par seconde. L'intensité varie alors entre zéro et le quadruple de l'intensité du son simple, et le renforcement aussi bien que l'alternance arrivent à rendre le son perceptible à l'oreille.

Nous venons de voir que, pour les sons les plus faibles, l'alternance de l'intensité peut servir à renforcer l'impression produite sur l'oreille; nous devons en conclure que cette alternance doit pouvoir servir à rendre l'impression d'un son fort, plus pénétrante et plus vive que ne le ferait une intensité régulière et durable.

Nous avons décrit jusqu'à présent les phénomènes tels qu'ils se présentent pour des battements dont le nombre ne dépasse pas 20 ou 30 à la seconde. Nous avons vu que les battements restent encore tout à fait appréciables dans le médium de la gamme, et forment une série de secousses sonores distinctes. Mais ici la limite perceptible de leur nombre n'est pas encore atteinte.

L'intervalle si_2, ut_3, nous donne 33 battements par seconde, ce qui rend le son aigre et sifflant. L'intervalle d'un ton entier, $si\flat_2\ ut_3$, en donne environ le double, et cependant, il est beaucoup moins aigre que l'intervalle précédent, qui est plus petit. Enfin, d'après le calcul, l'intervalle de la tierce mineure, $la_2\,ut_3$, devrait donner 88 battements; mais, en réalité, cet intervalle conserve à peine un peu de la dureté que produisent les battements des intervalles moins grands. On pourrait supposer que le nombre croissant des battements en rend l'impression confuse et inappréciable à l'oreille. A l'appui de cette hypothèse, nous aurions l'analogie de l'œil qui n'est plus en état de distinguer les unes des autres, une série d'impressions lumineuses se succédant rapidement, lorsque le nombre en est trop considérable. Imaginons un charbon incandescent décrivant un cercle. S'il décrit le cercle environ 10 ou 15 fois par seconde, l'œil croit voir un cercle continu de feu. Il en est de même pour les disques de plusieurs couleurs dont l'aspect est bien connu de la plupart des lecteurs. Quand un disque de ce genre fait plus de 10 tours par seconde, les différentes couleurs qu'il porte se mêlent pour donner une image immobile de leur mélange. Ce n'est qu'avec une lumière très-intense que la succession des secteurs diversement colorés peut être visible pour une vitesse plus grande, de 20 à 30 tours par seconde. Il se produit donc pour l'œil un phénomène tout à fait analogue à celui que nous avons rencontré pour l'oreille. Quand l'excitation et le repos se succèdent à trop courts intervalles, les deux impressions se mêlent, et la sensation devient continue et prolongée.

Cependant, pour l'oreille, nous pouvons nous convaincre que le nombre croissant des battements n'est pas la seule cause qui détermine leur mélange en une seule sensation. En passant du demi-ton,

si_2 ut_3, à la tierce mineure, la_2 ut_3, nous avons augmenté non-seulement le nombre des battements, mais la grandeur de l'intervalle. Mais nous pouvons accroître le nombre des battements sans changer la grandeur de l'intervalle, en prenant les deux sons dans une région plus élevée de la gamme. Au lieu de si_2 ut_3, prenons-les à l'octave supérieure si_3 ut_4, nous avons 66 battements ; si_4 ut_5 en donne même 132, qui sont en réalité perceptibles de la même manière que les 33 de si_2 ut_3, quoique devenant beaucoup plus faibles pour les plus grandes hauteurs. Cependant les 66 battements du demi-ton si_3 ut_4 produisent une impression plus aigre et plus pénétrante que ceux, en même nombre, du ton $si_2\flat$ ut_3 ; et les 88 battements de l'intervalle mi_4 fa_4 sont encore très-appréciables, tandis que ceux de la tierce mineure la_2 ut_3 sont presque absolument imperceptibles. Il paraîtra peut-être étrange et tout à fait incroyable aux acousticiens, qu'on puisse entendre, comme je l'avance ici, jusqu'à 132 battements à la seconde ; mais il est facile de faire l'expérience ; et si on émet une série de demi-tons sur un instrument qui tienne le son, comme l'orgue ou l'harmonium, en commençant par le bas et montant de plus en plus, on entend dans le bas des battements très-lents (si_{-1} ut_0 en donne $4\,^1/_8$, $si_0 ut_1$ $8\,^1/_4$, si_1 ut_2 $16\,^1/_2$). Plus on s'élève dans la gamme, plus le nombre des battements augmente, le caractère de la sensation restant absolument invariable. On peut ainsi passer graduellement de 4 à 132 battements par seconde, et se convaincre que, si la faculté de compter cesse, il n'en est pas de même de l'appréciation du caractère d'une série de secousses sonores produisant une sensation intermittente. En tout cas, il faut remarquer ici, que les secousses deviennent beaucoup plus aigres, et appréciables même dans les hautes régions de la gamme, en prenant des intervalles d'un 1/4 de ton, ou de moins encore. La dureté la plus perçante se produit dans les parties élevées de la gamme pour un nombre de 30 ou 40 battements. Aussi la discordance produite par un écart d'une fraction de demi-ton entre deux sons aigus émis simultanément, est-elle beaucoup plus sensible que pour les sons graves. Pendant que deux ut_2, séparés l'un de l'autre par la dixième partie d'un demi-ton, ne donnent guère qu'un battement par seconde, ce qui ne peut être apprécié que par une observation attentive, et ce qui, du moins, ne produit point de dureté, deux ut_3 donnent avec le même écart 4 battements, et deux ut_4 en donnent 8, ce qui produit un effet très-désagréable. Le caractère de dureté varie avec le nombre de battements. Les battements lents donnent, pour ainsi dire, une dureté d'une nature plus lourde, qu'on pourrait appeler un ronflement ou un roulement ; les battements rapides donnent une dureté plus perçante et plus aigre.

Le grand nombre des battements n'est donc pas la cause, ou du moins la seule cause qui les rende inappréciables ; la grandeur de l'intervalle exerce aussi une influence, et, par suite, on peut, avec des sons aigus, produire des battements perceptibles plus rapides qu'avec les sons graves.

L'observation montre donc, d'une part, que les mêmes intervalles ne donnent pas, dans les différentes régions de la gamme, des battements également appréciables. Dans le haut, les battements deviennent inappréciables, plutôt à cause de leur nombre croissant. Les battements d'un demi-ton se conservent appréciables jusqu'aux limites supérieures de l'octave d'indice 5 ; aussi cet intervalle forme-t-il la limite des sons musicaux employés en harmonie. Les battements d'un ton, très-appréciables et très-forts dans les régions graves, sont à peine sensibles à la limite supérieure de l'octave d'indice 4. En revanche, les tierces majeure et mineure qui, au milieu de la gamme, peuvent être considérées comme des consonnances, et ne présentent, pour ainsi dire, aucune dureté dans la gamme naturelle, sonnent très-dur dans les octaves graves et donnent des battements appréciables.

D'autre part, la netteté des battements et la dureté de l'intervalle ne dépendent pas seulement, comme nous l'avons vu, du nombre de battements. En faisant abstraction, en effet, de la grandeur de l'intervalle, on devrait trouver la même dureté pour les intervalles suivants, qui, d'après le calcul, présentent le même nombre de 33 battements :

le demi-ton.............	si_2 ut_3
le ton..................	ut_2 $ré_2$ et $ré_2$ mi_2
la tierce mineure.......	mi_1 sol_1
la tierce majeure.......	ut_1 mi_1
la quarte...............	sol_0 ut_1
la quinte...............	ut_0 sol_0

Nous trouvons plutôt, au contraire, que les derniers intervalles présentent une dureté toujours décroissante. La dureté de l'intervalle frappé dépend donc à la fois, de la grandeur de l'intervalle et du nombre des battements. Quant à la raison de cette dépendance, nous avons déjà vu plus haut que les battements ne peuvent se produire dans l'oreille, que s'ils proviennent de deux sons assez voisins l'un de l'autre dans la gamme, pour faire vibrer en même temps par influence le même prolongement nerveux. Si les deux sons s'éloignent trop l'un de l'autre, les vibrations des fibres de Corti simultanément ébranlées sont trop faibles pour que les battements auxquels elles donnent lieu puissent être encore appréciables, en

supposant toutefois qu'il ne vienne s'y mêler ni harmoniques ni sons résultants. D'après l'hypothèse que nous avons faite dans un précédent chapitre, pour évaluer la proportion dans laquelle s'éteignent les vibrations des organes de Corti, il résulterait, par exemple, que, pour une différence d'un ton entier, *ut ré*, entre les deux sons excitateurs, les fibres de Corti dont le son propre est *ut* ♯, seraient ébranlées par chaque son, de 1/10 de son intensité propre; elles doivent par conséquent battre avec une intensité variant entre 0 et 4/10. Émettons au contraire les sons simples *ut*, et *ut* ♯; il résulte de la table consignée dans le précédent chapitre, que les fibres de Corti correspondant au milieu, entre *ut* et *ut* ♯, battront avec une intensité variant entre 0 et 12/10. Inversement, l'intensité des battements ne sera plus que de 0,194 pour une tierce mineure, de 0,108 pour une tierce majeure, de manière à devenir presque inappréciables à côté des sons primaires dont l'intensité est 1. La même figure 45, déjà employée pour représenter l'intensité des vibrations d'influence exécutées par les fibres de Corti pour un écart croissant du son émis avec le son propre de la fibre, va encore nous servir ici, pour figurer l'intensité des battements déterminés dans l'oreille par deux sons différents de la gamme. Nous devons seulement partager la base en divisions telles, que 5 corresponde à la distance d'un ton entier, et non d'un demi-ton, comme plus haut. Dans le cas présent, en effet, la distance des deux sons est double de la distance de chacun d'eux à la fibre moyenne considérée.

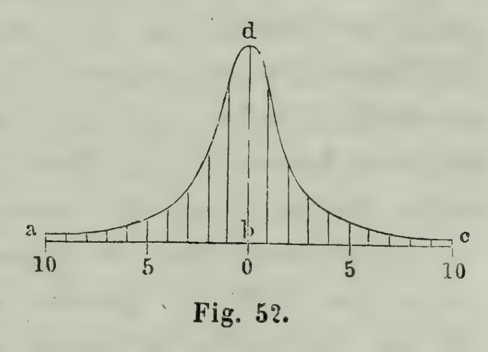


Fig. 52.

Si les fibres de Corti avaient, dans toutes les régions de la gamme, une égale faculté d'étouffer les vibrations, et si le nombre des battements n'avait aucune influence sur la dureté de la sensation, des intervalles égaux donneraient aussi une égale dureté dans toutes les régions de la gamme. Comme au contraire, en réalité, les mêmes intervalles sont moins durs dans le haut que dans le bas, il faut admettre, ou bien que les vibrations des organes de Corti s'éteignent moins bien dans le haut que dans le bas, ou bien que les battements rapides se distinguent plus difficilement dans l'appareil de la sensation.

Je ne vois encore aucun moyen de choisir entre ces deux hypothèses; nous pouvons bien cependant considérer la première comme la plus invraisemblable; du moins, sur tous nos instruments de musique, il est d'autant plus difficile d'empêcher un corps vibrant de

communiquer ses vibrations à ce qui l'entoure, qu'il émet un son plus haut. Les cordes très-courtes sonnant à l'aigu, les petites languettes métalliques ou plaques, etc., donnent des sons aigus extraordinairement brefs, tandis que les sons graves émis par des cordes, des plaques plus grosses, peuvent facilement se prolonger longtemps. La seconde hypothèse est, au contraire, confirmée par l'analogie des autres appareils nerveux du corps humain, et en particulier de l'œil. J'ai déjà dit qu'une série d'impressions lumineuses se succédant rapidement à intervalles réguliers, produit dans l'œil une sensation lumineuse régulièrement prolongée. Si les excitations lumineuses se suivent très-rapidement, l'impression de chacune d'elles se prolonge sans perdre de son intensité, jusqu'à l'arrivée de la suivante, en sorte que la sensation ne permet plus de distinguer les pauses. Pour l'œil, le nombre des excitations lumineuses ne peut guère dépasser 24 à la seconde sans qu'elles se confondent en une seule impression continue. En cela, l'œil est de beaucoup surpassé par l'oreille, car on peut distinguer en une seconde jusqu'à 132 intermittences sonores, et vraisemblablement, nous n'avons pas encore là la limite supérieure. On pourrait peut-être encore entendre des sons beaucoup plus élevés en leur donnant une intensité suffisante. Par la nature des choses, les différents appareils de la sensation présentent sous ce rapport un degré différent de mobilité, parce que l'effet en question dépend non-seulement de la mobilité des molécules nerveuses, mais aussi de la mobilité des appareils auxiliaires au moyen desquels l'excitation nerveuse se produit ou s'éteint. Les muscles sont beaucoup plus inertes que l'œil; dix décharges électriques, traversant les nerfs pendant une seconde, suffisent en général pour mettre en contraction continue les muscles d'une partie quelconque du corps, dont le mouvement est volontaire. Pour les muscles des parties dont les mouvements sont involontaires, comme ceux de l'intestin, des vaisseaux, etc., les intervalles entre les excitations peuvent atteindre la durée d'une seconde entière, ou même plus, sans faire cesser la continuité de la sensation.

L'oreille présente, sur les autres appareils nerveux, une grande supériorité sous ce rapport; elle est éminemment l'organe destiné à percevoir les petits intervalles de temps, et a été depuis longtemps utilisée comme telle par les astronomes. Il est bien connu que, quand deux pendules oscillent l'un à côté de l'autre, l'oreille peut apprécier à environ 1/100 de seconde près, si les coups coïncident ou non. L'œil se tromperait de 1/24 de seconde, ou même d'une fraction beaucoup plus grande, pour distinguer si deux éclairs lumineux coïncident ou non.

Mais, malgré la supériorité de l'oreille sur les autres organes du corps, nous ne pouvons cependant pas hésiter à supposer que chez elle, de même que pour les autres appareils nerveux, il existe une limite à la rapidité de son pouvoir de perception ; nous pouvons même admettre qu'en n'arrivant à percevoir que faiblement 132 battements à la seconde, nous approchons de cette limite.

CHAPITRE IX

LIMITE DES SONS GRAVES PERCEPTIBLES.

Les battements donnent un moyen sûr de déterminer les limites des sons graves, et de se rendre compte de certaines propriétés qui permettent de passer de la sensation de secousses sonores distinctes à celle d'un son tout à fait continu ; nous allons nous en occuper en premier lieu.

A la question de savoir le plus petit nombre de vibrations pouvant encore donner la sensation d'un son, on n'a donné, jusqu'ici, que des réponses très-contradictoires. Les solutions fournies par les divers observateurs varient entre 8 (Savart) et peut-être 30 vibrations entières par seconde. La contradiction s'explique par certaines difficultés que rencontre l'expérience.

D'abord, si l'on veut produire sur l'oreille une impression équivalente, il est nécessaire d'obtenir une intensité dans les vibrations aériennes beaucoup plus grande pour les sons très-graves, que pour les sons aigus. Plusieurs acousticiens ont quelquefois émis l'opinion que, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité des sons de différentes hauteurs était directement proportionnelle à la force vive du mouvement de l'air, ou, ce qui revient au même, à la valeur du travail mécanique employé à produire le mouvement ; mais une simple expérience au moyen de la sirène prouve que, si on emploie le même travail mécanique pour produire, dans les mêmes circonstances, des sons graves ou aigus, ces derniers donnent une sensation extraordinairement plus forte que les sons graves. Ainsi, par exemple, qu'on fasse arriver le vent au moyen d'un soufflet dans la sirène, de manière que le disque prenne une vitesse de rotation croissante, en ayant soin d'entretenir régulièrement le mouvement du soufflet, en élevant toujours de la même hauteur, et le même nombre de fois par minute, la tige du soufflet ; de cette manière, ce dernier reste régulièrement rempli, et il passe toujours dans la sirène la même quantité d'air à la même pression. On a, dans ces conditions, tant que la sirène tourne lentement, un son, faible et grave d'abord, qui monte de plus en plus, et qui, en même temps, acquiert une intensité croissante, de telle sorte

que les sons d'environ 880 vibrations, les plus aigus que je produise sur ma sirène double, ont une force à peine tolérable. Ici la plus grande partie du travail mécanique constant est employée à la production du mouvement sonore ; une faible partie se perd par le frottement du disque sur ses axes et par l'air qui tourbillonne ; ces pertes doivent augmenter avec la rapidité de la rotation, en sorte que la production des sons aigus doit se faire réellement au moyen d'un travail moindre que celle des sons graves ; et cependant, comme sensations, les sons aigus paraissent extraordinairement plus forts que les sons graves. Jusqu'à quelle hauteur continue cet accroissement d'intensité, c'est ce que je ne saurais dire, parce que la vitesse de ma sirène ne peut s'élever plus haut, en conservant la même pression.

Cet accroissement de l'intensité avec la hauteur est particulièrement manifeste, dans les régions les plus basses de la gamme. Il en résulte que, dans les sons complexes très-graves, les harmoniques peuvent surpasser en intensité le son fondamental, même dans le cas où, pour les sons de même nature, mais de plus grande hauteur, l'intensité du son fondamental serait de beaucoup prépondérante. C'est ce qu'il est facile de reconnaître sur ma sirène double, où le nombre des battements permet de constater sans difficulté, si le son qu'on entend par-dessus les autres est le fondamental, le premier ou le second harmonique. Ainsi, si l'on ouvre dans les deux caisses à vent les séries de 12 trous, et si l'on fait faire un tour entier à la manivelle qui met en mouvement la caisse supérieure, le son fondamental donne, comme on l'a vu plus haut, 4 battements, le premier harmonique 8, et le second 12. Rendons la rotation du disque plus lente qu'à l'ordinaire ; à cet effet, j'adapte au bord du disque, pour différentes pressions, une plume d'acier huilée ; on peut ainsi facilement produire des séries de secousses aériennes correspondant aux sons très-graves, puis tourner la manivelle et compter les battements. Si l'on fait croître progressivement la vitesse du disque, on trouve que les sons perceptibles qui se produisent les premiers, font 12 battements à chaque tour de manivelle, tant que le nombre des secousses aériennes demeure compris entre 36 et 40. Pour les sons compris entre 40 et 80 impulsions aériennes, on entend 8 battements à chaque tour de la manivelle. Ici c'est donc l'octave supérieure, qui présente la plus grande intensité. Ce n'est que pour plus de 80 secousses qu'on entend les quatre battements du son fondamental.

On peut ainsi prouver par l'expérience que les mouvements de l'air qui n'ont pas la forme des vibrations pendulaires, peuvent déterminer la sensation, nette et forte, de sons dont les nombres de vibrations sont deux ou trois fois aussi grands que ceux du son fondamental, sans

que celui-ci puisse se faire entendre à travers les précédents. Si l'on descend de plus en plus dans la gamme, l'intensité de la sensation sonore diminue si rapidement, d'après ce qui précède, que le son fondamental dont la force vive est par elle-même plus grande que celle des harmoniques, ce qui se prouve en donnant le même son dans des régions plus aiguës, se trouve éteint et couvert par les harmoniques. On a beau renforcer de beaucoup l'action du son sur l'oreille, le phénomène ne change pas. Dans mes expériences sur la sirène, le plateau supérieure du soufflet était fortement ébranlé par les sons graves, et si j'y posais la tête, elle vibrait tout entière par influence avec une telle énergie, que les trous du disque tournant, au lieu de disparaître pour moi comme ils l'auraient fait si mon œil eût été au repos, m'apparaissaient de nouveau comme distincts, par un effet d'optique analogue à ce qui se produit dans les disques stroboscopiques ou phénakisticopes. La série de trous mise en jeu paraissait immobile, les autres s'agitaient en avant ou en arrière, et cependant les sons les plus graves n'étaient pas plus nets. Une autre fois, au moyen d'un tube convenablement choisi, je mis mon conduit auditif en communication avec un orifice qui conduisait dans l'intérieur du soufflet. Les trépidations du tympan étaient si fortes, qu'elles produisaient une démangeaison insupportable, et cependant les sons très-graves n'étaient pas plus nets.

Si l'on veut, par conséquent, déterminer les limites des sons les plus graves, il est nécessaire, non-seulement de produire dans l'air des ébranlements très-considérables, mais encore de leur donner la forme des vibrations simples pendulaires. Tant que cette dernière condition n'est pas remplie, on ne sait pas du tout si les sons graves que l'on perçoit correspondent au son fondamental ou aux harmoniques du mouvement de l'air (1).

Parmi les instruments employés jusqu'ici, ce sont les grands tuyaux bouchés de l'orgue qui sont les plus appropriés à cette expérience. Leurs harmoniques sont du moins assez faibles, quoiqu'ils ne fassent pas tout à fait défaut. On trouve, en s'aidant de ces tuyaux, que déjà les sons inférieurs de l'octave (d'indice$—_1$, *ut*$—_1$ à *mi*$—_1$), commencent à se transformer en un bruit, mêlé de tremblement; ainsi il est très-difficile, même à une oreille exercée, d'en apprécier la hau-

(1) Ainsi l'appareil de Savart, où une barre tournante frappe à travers des fentes étroites, est tout à fait impropre à rendre perceptibles les sons les plus graves. Les secousses isolées sont ici très-courtes en comparaison de la période entière de la vibration ; aussi les harmoniques se développent-ils avec une grande force, et les sons les plus graves, qu'on entend avec 8 ou 16 battements, ne peuvent-ils être autre chose que des harmoniques.

teur d'une manière certaine; aussi ne peut-on les accorder avec le secours de l'oreille seule, mais seulement indirectement, au moyen des battements qu'ils donnent avec les sons des octaves supérieures. Il se produit quelque chose d'analogue pour les mêmes sons très-graves du piano et de l'harmonium ; ils présentent aussi un tremblement particulier et ne sont pas purs, quoique, grâce aux harmoniques supérieurs dont ils sont accompagnés, leur caractère musical soit, en somme, plus satisfaisant que celui des sons des tuyaux. Dans la musique à grand orchestre, le plus grave des sons employés est le *mi*$-_1$ de la contre-basse avec 41 vibrations, et je crois pouvoir avancer, en toute sécurité, que tous les efforts de la facture moderne pour produire de beaux sons dans le grave doivent certainement échouer, non pas qu'on manque de moyens de déterminer les mouvements nécessaires dans l'air, mais parce que l'oreille humaine refuse ses services. L'*ut*$-_1$ de l'orgue, avec 33 vibrations, donne cependant une sensation encore assez continue de tremblement, mais sans qu'on puisse lui assigner une place déterminée dans l'échelle musicale. On commence plutôt dans cette région à distinguer individuellement les secousses aériennes, malgré la forme régulière du mouvement. Dans la moitié supérieure de l'octave d'indice$-_2$, la sensation des secousses isolées devient de plus en plus nette, tandis que la portion continue de la sensation, celle qu'on peut encore comparer avec la sensation sonore, va s'affaiblissant; dans la moitié grave de la même octave, on n'entend plus guère que les secousses aériennes isolées, ou, si l'on entend quelque chose d'autre, ce ne peuvent être que des harmoniques faibles, dont les sons mêmes des tuyaux bouchés ne sont pas entièrement exempts.

J'ai cherché à produire d'une autre manière encore des sons graves simples. Quand on ébranle des cordes chargées en leur milieu d'un morceau de métal pesant, elles donnent un son composé d'un certain nombre de sons simples non harmoniques entre eux. Le son fondamental est séparé des sons supérieurs les plus voisins par un intervalle de plusieurs octaves, et, par conséquent, on ne court pas le risque de le confondre avec eux ; en outre, les sons supérieurs s'éteignent très-rapidement, tandis que les sons graves durent très-longtemps. Une corde de ce genre (1) était tendue sur une caisse résonnante munie d'une seule ouverture pouvant communiquer avec le conduit auditif au moyen d'un tube ; de cette manière, l'air de la

(1) C'était une mince corde de piano en laiton. Elle était chargée en son milieu d'un sou en cuivre qu'elle traversait. La corde une fois passée ans le trou, on enfonçait à coups de marteau une pointe d'acier entre le morceau de cuivre et la corde, de manière à fixer celle-ci invariablement dans le trou.

caisse résonnante ne pouvait s'échapper que dans l'oreille. Dans ces circonstances, les sons de hauteur ordinaire présentent une intensité intolérable. En revanche le *ré*$_{-1}$, de 37 vibrations, ne fait encore entendre qu'une très-faible sensation sonore, et encore celle-ci a-t-elle quelque chose de roulant, d'où il faut conclure que l'oreille commence à percevoir séparément les secousses isolées, malgré leur forme régulière. Pour le *si* ♭$_{-2}$ (31 vibrations), on entendait à peine encore un son. Il semble donc que les fibres nerveuses, destinées à percevoir ces sons graves, ne sont déjà plus ébranlées avec une intensité régulière pendant toute la durée de la vibration, l'excitation auditive se produisant soit au moment de la plus grande vitesse de la molécule d'air vibrante, soit au moment du plus grand écart de la position d'équilibre.

D'après cela, on peut bien prétendre que, si la sensation commence à environ 30 vibrations, les sons ne commencent qu'à environ 40 vibrations à prendre une hauteur musicale déterminée. Ces faits rentrent dans l'hypothèse sur les prolongements nerveux élastiques, si l'on imagine que les fibres de Corti les plus graves peuvent vibrer sous l'influence de sons encore plus graves qu'elles, mais avec une intensité rapidement décroissante ; il serait, par conséquent, possible d'éprouver une sensation sonore, mais absolument impossible de distinguer la hauteur. Si les fibres de Corti les plus graves sont plus éloignées les unes des autres dans la gamme, mais qu'en même temps elles aient un pouvoir d'étouffement assez fort, pour qu'à chaque son correspondant à la hauteur d'une fibre, les fibres voisines soient affectées d'une manière encore sensible, la distinction des hauteurs sera incertaine dans ces régions, le son variera d'une manière continue, sans secousses, et, en même temps, l'intensité de la sensation deviendra plus faible.

Tandis que les sons simples de la moitié supérieure de l'octave d'indice—1 sont déjà tout à fait continus, et présentent un caractère musical, la perception des secousses distinctes pour les vibrations de l'air non pendulaires, et par conséquent pour les sons composés, ne disparaît pas complétement, même dans la contre-octave (d'indice 0). Si, par exemple, on met en mouvement, au moyen de l'air, le disque de la sirène avec une vitesse progressivement croissante, on commence par n'entendre d'abord que des secousses isolées ; à partir de plus de 36 vibrations, il vient s'y joindre des sons faibles, mais qui sont d'abord des harmoniques.

La sensation sonore croît de plus en plus avec la vitesse, mais on reste encore longtemps avant de cesser de percevoir les secousses isolées, quoique celles-ci, de leur côté, tendent à se confondre de plus en plus. C'est à partir de 110 à 120 vibrations (*la*$_0$ ou *si*$_0$♭), que le

son commence à présenter une notable continuité. Les choses se passent exactement de même sur l'harmonium, où l'ut_1 du registre du cor (132 vibrations), et même l'ut_2 du registre du basson (264 vibrations), présentent encore une sorte de ronflement. En général, le même phénomène se produit avec plus ou moins de netteté pour tous les sons aigres, ronflants, saccadés, qui, comme on l'a déjà dit, sont toujours accompagnés d'un très-grand nombre d'harmoniques nets.

La raison de ce fait réside dans les battements produits par les harmoniques élevés et voisins des sons dont il s'agit. Si, dans un son composé, on peut encore entendre le 15e et le 16e son partiels, ces deux derniers forment entre eux un intervalle d'un demi-ton, et donnent naturellement les battements désagréables de cette dissonnance. On peut facilement s'assurer, en appliquant à l'oreille un tube résonnant convenablement choisi, que ce sont bien en réalité les battements de ces deux sons partiels qui produisent la dureté du son total. Qu'on émette le sol_{-1} (49 1/2 vibrations); le 15e son partiel est $fa\sharp_3$, le 16e, sol_3, le 17e, sol_3, etc... Si j'arme mon oreille du résonnateur sol_3, qui renforce tous ces derniers sons partiels, mais surtout le sol_3, et moins le $fa\sharp_3$ et le $sol\sharp_3$, la dureté du son total devient extraordinairement plus grande, et tout à fait analogue à l'aigre grincement que donnerait l'émission simultanée du $fa\sharp_3$ et du sol_3. Cette expérience réussit sur le piano aussi bien que sur les deux registres de l'harmonium. Elle réussit encore pour les régions aiguës aussi haut que peuvent atteindre les résonnateurs. J'en ai un en sol_4, qui peut encore renforcer le sol_4, mais peu; en l'adaptant à l'oreille, on entend cependant nettement la dureté du *sol* de 99 vibrations prendre un caractère plus aigre.

Déjà le 8e et le 9e son partiels, séparés l'un de l'autre, par un intervalle d'un ton entier, doivent donner des battements, mais produisant un son moins aigre que les harmoniques plus élevés. Ici, les résonnateurs ne renforcent pas aussi bien, parce que ceux d'entre eux au moins qui sont graves, ne sont pas en état de renforcer simultanément deux sons séparés l'un de l'autre par un intervalle d'un ton entier.

Pour les résonnateurs aigus, qui donnent un moindre renforcement, l'intervalle qui sépare les sons renforcés est plus grand; aussi m'est-il arrivé, au moyen de résonnateurs allant de sol_3 à sol_4, d'augmenter la dureté des sons compris entre sol_0 et sol_1 (de 99 à 198 vibrations), dureté qui dépend des 7e, 8e et 9e sons partiels (fa_3, sol_3, et de la_2 à fa_4, sol_4 et la_4); en comparant le son du *sol* dans le résonnateur, au son de la dissonnance $fa_3\,sol_3$ ou $sol_3\,la_3$, directement frappée, on reconnaît aussi que les deux effets sont très-semblables, et en

particulier que la rapidité des intermittences est à peu près la même dans les deux cas.

On peut donc considérer, comme hors de toute contestation, que les mouvements de l'air, correspondant à des sons graves, accompagnés de beaucoup d'harmoniques, éveillent en même temps la sensation et de sons graves élémentaires continus, et de sons aigus élémentaires discontinus, qui donnent à l'ensemble un caractère dur et grinçant. C'est là l'explication du fait trouvé plus haut dans l'étude des timbres, à savoir, que les sons, accompagnés de beaucoup d'harmoniques aigus, sont aigres, ronflants ou tremblants; c'est ce qui fait aussi qu'ils sont beaucoup plus pénétrants que les autres, et que l'oreille ne peut pas les supporter aussi facilement. En effet, une impression intermittente détermine une excitation beaucoup plus forte dans nos appareils nerveux, et s'impose toujours à la sensation avec une nouvelle intensité. Par contre, des sons simples, ou des sons composés qui ne contiennent qu'un petit nombre d'harmoniques graves, éloignés les uns des autres, doivent déterminer dans l'oreille une sensation parfaitement continue qui produit une impression douce, suave et peu énergique, même si, en réalité, les sons émis présentent une intensité relativement grande.

Jusqu'ici nous n'avons pas pu déterminer le plus grand nombre d'intermittences pouvant rester perceptibles dans les notes aiguës; nous nous sommes bornés à faire remarquer que, toutes choses égales d'ailleurs, il est d'autant plus difficile de percevoir ces intermittences, et qu'elles produisent une impression d'autant plus faible, qu'elles sont en nombre plus considérable. Par conséquent, bien que la forme du mouvement, c'est-à-dire le timbre, demeure invariable quand la hauteur croît, en général, le timbre présentera moins de dureté pour des hauteurs croissantes. En particulier, la région de la gamme, qui avoisine le $fa\sharp_5$, doit jouer un rôle important, car, à cette hauteur, l'oreille présente, comme on l'a remarqué plus haut, une sensibilité toute particulière. Les harmoniques dissonnants, qui peuvent se rencontrer dans cette région, doivent y être particulièrement sensibles. Le $fa\sharp_5$ est le 8e son partiel du $fa\sharp_2$ de 367 vibrations, qui appartient à la fois aux sons supérieurs de la voix d'homme et aux sons graves de la voix de femme; c'est en même temps le 16e du $fa\sharp_1$ du médium de la voix d'homme. J'ai déjà dit plus haut que des voix humaines, simultanément émises avec effort, faisaient souvent entendre ces notes aiguës. Quand la chose a lieu pour les sons graves des voix d'homme, il doit se produire une dissonnance aigre, et, en réalité, comme je l'ai déjà remarqué plus haut, on entend, dans le *forte vibrato* d'une forte basse-taille, les sons aigus de l'octave

d'indice 5, donnant lieu à un tremblement éclatant. Aussi, le roulement saccadé est-il beaucoup plus fréquent et plus fort dans les voix de basse que dans les voix aiguës. Pour les sons au-dessus du *fa*$\sharp_2$, les dissonnances des notes supérieures, situées dans l'octave d'indice 5, sont moins dures que celles d'une seconde majeure, et, à cette hauteur, sont à peine encore assez fortes pour se faire sentir d'une manière appréciable.

On s'explique de cette manière l'impression plus agréable produite, en général, par les voix élevées, et le désir éprouvé par tous les chanteurs et toutes les chanteuses d'arriver dans le haut. Il faut ajouter encore à cela que, dans les régions élevées, une légère atteinte à la justesse produit un beaucoup plus grand nombre de battements que dans les régions graves ; aussi le sentiment musical peut-il apprécier bien plus sûrement, dans le haut que dans le bas, la hauteur, la justesse et la beauté des intervalles musicaux.

CHAPITRE X

BATTEMENTS DES HARMONIQUES.

Nous nous sommes jusqu'ici bornés à considérer des battements dus à l'émission de deux sons simples, sans mélange d'harmoniques ou de sons résultants. Ces battements ne pouvaient prendre naissance que si les deux sons simples, émis simultanément, sont séparés l'un de l'autre par un intervalle relativement petit; si cet intervalle atteint seulement la valeur d'une tierce mineure, les battements cessent d'être appréciables. Il est cependant bien connu, que des battements peuvent encore se produire, par l'émission simultanée de deux sons séparés par un intervalle beaucoup plus grand; nous verrons même bientôt que ces battements jouent un rôle capital dans la détermination des intervalles consonnants de nos gammes musicales ; aussi allons-nous ici les étudier à fond. Les battements de ce genre, produits par des sons distants de plus d'une tierce mineure, sont dus à l'influence des harmoniques et des sons résultants. Si les sons dont il s'agit sont accompagnés d'harmoniques nettement appréciables, les battements qui en proviennent sont, le plus souvent, beaucoup plus forts et plus nets que ceux provenant des sons résultants, et il est aussi beaucoup plus facile d'en déterminer l'origine. Dans l'étude des battements des intervalles assez grands, nous commencerons donc par étudier les battements dus à l'influence des harmoniques. Il faut cependant remarquer, que les battements des sons résultants se présentent beaucoup plus généralement, dans toute espèce de son; les battements des harmoniques, au contraire, ne peuvent naturellement se produire qu'avec des sons munis d'harmoniques nettement prononcés. Mais comme, à peu d'exceptions près, les sons usités en musique sont richement pourvus en harmoniques intenses, les battements des harmoniques ont une importance pratique relativement beaucoup plus grande que les faibles battements des sons résultants.

Si deux sons, présentant des harmoniques, sont émis simultanément, il est facile de voir, d'après ce qui précède, qu'il peut se produire des battements, toutes les fois que deux des harmoniques des deux sons respectifs sont suffisamment voisins l'un de l'autre, ou même si l'un des sons fondamentaux se rapproche d'un des harmo-

niques de l'autre. Le nombre des battements produits est naturellement égal à la différence des nombres de vibrations des deux sons partiels producteurs des battements. Si cette différence est faible, les battements sont lents, et, comme les battements lents des sons primaires, relativement beaucoup plus faciles à compter, et, en général, à reconnaître d'après leur nature. Leur netteté augmente aussi avec la force des sons partiels excitateurs, c'est-à-dire, pour les timbres usités en musique, avec la force des harmoniques inférieurs, puisque, régulièrement, l'intensité des harmoniques varie en sens inverse de leur numéro d'ordre.

On peut commencer par des exemples analogues aux suivants pris sur l'orgue (registre principal), ou sur l'harmonium.



Les blanches indiquent les sons fondamentaux qu'il faut émettre, et les noires les harmoniques correspondants. Si l'octave $ut_0 ut_1$ du premier exemple est prise dans la gamme naturelle, elle ne fera point entendre de battements. Si, au contraire, on change la note supérieure, comme dans les exemples 2 et 3, en si_0 ou $ré\flat_1$, on obtient les mêmes battements qu'on aurait eus directement en donnant le demiton $si_1\, ut_1$ ou $ut_1\, ré\flat_1$. Le nombre des battements est le même ($16\frac{1}{2}$ par seconde), leur intensité sera cependant un peu plus faible parce qu'ils sont éteints dans une certaine mesure par le fort son grave ut_0 et que l'ut_1, premier harmonique d'ut_0, n'a pas, en général la même intensité que le son fondamental.

Dans les exemples 4 et 5, on entendra des battements se produire sur un instrument faux, même sur un instrument bien accordé suivant le tempérament égal (1), parce que le la_3 donné par l'instrument n'est pas exactement à l'unisson avec le la_3 deuxième harmonique du $ré_2$. En revanche, le la_3 de l'instrument est exactement à l'unisson avec le la_3, qui est le premier harmonique du la_2 du 5ᵉ exemple ; aussi dans les exemples 4 et 5 devons-nous obtenir beaucoup de battements, même sur un instrument qui est d'accord.

Comme le premier harmonique fait deux fois autant de vibrations que le son fondamental, dans le premier exemple, l'ut_1 émis directement doit être identique avec le premier harmonique de l'ut_0 grave, si l'ut_1 frappé fait exactement deux fois autant de vibrations

(1) Il y aura un battement par seconde, dans ce dernier cas.

que l'ut_0 grave. Ce n'est que pour ce rapport de 2 à 1, que les deux sons peuvent résonner simultanément sans donner de battements. Le plus petit écart, entre l'intervalle ut_0 ut_1 et ce rapport de 2 à 1, sera révélé par la présence des battements.

Dans le 4e exemple, les battements ne cesseront que si nous faisons exactement coïncider le la_3 de l'instrument avec le 2e harmonique du $ré_2$, et cela ne peut avoir lieu que si les vibrations de ce la_3 sont en nombre exactement triple de celles du $ré_2$. Dans le 5e exemple, pour éviter les battements, il faudra obtenir pour les vibrations du *la* un nombre qui soit exactement la moitié de celui des vibrations du la_3, triple lui-même de celui des vibrations du $ré_2$; il faut donc, en d'autres termes, que les nombres de vibrations du $ré_2$ et du la_2 soient exactement dans le rapport de 2 à 3. Tout écart de ce rapport se trahira par les battements que produiront les deux sons simultanés.

Nous avions déjà vu, plus haut, que les nombres de vibrations de deux sons étaient entre eux comme 1 à 2 pour l'intervalle d'une octave, et comme 2 à 3 pour l'intervalle d'une quinte. On avait depuis longtemps trouvé ces rapports en cherchant, avec le secours de l'oreille seule, les combinaisons les plus agréables formées par deux sons simultanément émis. Ici nous avons déterminé la cause qui fait que les intervalles d'octave et de quinte, accordés selon ces rapports simples, peuvent seuls produire une consonnance pure et tranquille, tandis qu'un écart même très-faible de la justesse mathématique se trahit par des battements donnant au son un caractère flottant et irrégulier. Le $ré_2$ et le la_2 du dernier exemple, accordés à la quinte naturelle, font $293\frac{1}{3}$ et 440 vibrations ; leur harmonique commun la_3 a $3 \times 293\frac{1}{3} = 2 \times 440 = 880$ vibrations. Dans la gamme tempérée, le $ré_2$ fait $293\frac{2}{3}$ vibrations, son second harmonique en fait 881, et cette différence, extraordinairement faible, se révèle à l'oreille par un battement à la seconde. Les facteurs d'orgues savent depuis longtemps que l'octave et la quinte fausses donnent des battements ; et ils mettent ce phénomène à profit, pour pouvoir accorder l'instrument d'une manière prompte et sûre suivant la gamme naturelle ou tempérée ; en réalité il n'existe point de moyen plus sensible pour reconnaître la justesse d'un intervalle.

Donc deux sons dans le rapport d'une octave, d'une douzième ou d'une quinte naturelle, résonnent d'une manière régulière et sans se troubler mutuellement ; ils se distinguent par là des intervalles immédiatement voisins, l'octave et la quinte fausses, où une partie de la

masse sonore se divise en secousses isolées, en sorte que les deux sons ne peuvent coexister l'un à côté de l'autre sans action réciproque. Aussi appellerons-nous *intervalles consonnants*, l'octave, la douzième et la quinte naturelles, à l'opposé des intervalles immédiatement voisins que nous qualifierons de *dissonnants*. Ces noms existaient, il est vrai, depuis longtemps, avant qu'on sût quoi que ce soit des harmoniques et de leurs battements, mais ils désignent très-exactement l'essence du phénomène de la consonnance, altérée ou non.

Comme les phénomènes ici décrits forment la base essentielle de la fixation des intervalles normaux, nous allons les confirmer expérimentalement de toutes les manières possibles.

En premier lieu, j'ai avancé qu'ici les battements sont produits par ceux des harmoniques des deux sons qui tombent dans le voisinage les uns des autres. Il n'est pas toujours très-facile, en entendant une quinte ou une octave faiblement altérée de distinguer nettement, avec le seul secours de l'oreille, quelles sont les parties de l'ensemble sonore qui entrent en battements. L'impression produite est plutôt qu'on entend des renforcements et des affaiblissements dans toute la masse. Cependant une oreille exercée à distinguer les harmoniques pourra, en fixant son attention sur l'harmonique commun, entendre les forts battements de ce dernier, tandis que les sons fondamentaux continuent à résonner d'une manière continue. Qu'on donne le $ré_2$, qu'on dirige son attention sur l'harmonique la_3, puis qu'on produise la quinte tempérée la_2, et on pourra entendre nettement les battements du la_3. Pour une oreille non exercée, les résonnateurs précédemment décrits seront ici d'un grand secours. Si on met à l'oreille le résonnateur en la_3, on entend les battements de ce son se produire d'une manière perçante. Si, au contraire, on prend un résonnateur correspondant à l'un des deux sons fondamentaux, $ré_2$ ou la_2, les battements deviennent plus faibles, parce que la portion continue du son est seule renforcée.

Naturellement, mon hypothèse ne peut aller jusqu'à dire, qu'il n'y a pas d'autres harmoniques que le la_3 du dernier exemple qui donnent des battements. Au contraire, il y a encore des harmoniques supérieurs plus faibles qui donnent aussi des battements, et, en outre, dans le prochain chapitre, nous apprendrons à connaître les battements des sons résultants, qui accompagnent les battements des harmoniques. Seulement les battements des plus graves harmoniques communs jouent habituellement le rôle principal, parce qu'ils sont plus forts et plus lents que tous les autres.

En second lieu, il peut paraître désirable de prouver directement, par l'expérience, que les rapports numériques déduits des nombres de

vibrations des harmoniques sont bien, en réalité, ceux qui ne donnent pas de battements. Cette preuve peut être faite très-facilement au moyen de la sirène double décrite plus haut (*fig.* 49). En mettant les disques en rotation, et en ouvrant la série de 8 trous sur le disque inférieur, celle de 16 trous sur le disque supérieur, on obtient deux sons formant entre eux l'intervalle d'une octave. Ils résonnent simultanément sans battements, tant que la caisse supérieure ne tourne pas. Si, au contraire, on commence à faire tourner lentement la caisse supérieure, ce qui élève ou abaisse un peu le son qui en émane, les battements apparaissent aussitôt. Tant que la caisse supérieure demeure immobile, le rapport des nombres de vibrations est exactement celui de 1 à 2, parce qu'à chaque rotation du disque, la caisse inférieure donne exactement 8, et la caisse supérieure exactement 16 secousses aériennes. En tournant lentement la manivelle, on peut modifier ce rapport d'aussi peu qu'on veut ; mais, si lente que soit la rotation, on entend les battements qui accusent l'altération de l'intervalle.

Il en est de même pour la quinte. Qu'on ouvre, en haut, la série de 12, et, en bas, celle de 18 trous ; on entendra une quinte tout à fait pure, tant qu'on ne tourne pas la caisse à vent supérieure. Le rapport des nombres de vibrations, donnés par les nombres de trous des deux séries, est exactement de 2 à 3. Dès qu'on fait tourner la caisse supérieure, on entend les battements. Nous avons vu plus haut qu'à chaque tour complet de la manivelle, le nombre des vibrations du son de 12 trous était augmenté ou diminué de 4. Si nous produisions le son de 12 trous sur le disque inférieur, nous obtenions 4 battements. Avec la quinte de 12 et 18 trous nous obtenons, au contraire, pour chaque tour de manivelle, 12 battements, parce que, pour chaque tour de manivelle, le nombre des vibrations croît de $3 \times 4 = 12$, pour le troisième harmonique, s'il croît de 4 pour le son fondamental ; nous avons donc ici affaire aux battements de l'harmonique.

Dans ces recherches, la sirène a un grand avantage sur tous les autres instruments de musique : l'intervalle est accordé selon les rapports simples par le mécanisme même, d'une manière fixe et invariable, et, par conséquent, nous sommes dispensés d'une opération très-pénible et très-difficile, la mesure des nombres de vibrations, que nous serions obligés de faire pour la démonstration de notre loi, si nous voulions employer d'autres instruments. La loi a été déjà, du reste, établie anciennement au moyen de mesures de ce genre, et on avait trouvé une concordance d'autant plus exacte avec les rapports simples, que les méthodes pour mesurer et déterminer les nombres de vibrations étaient plus perfectionnées.

De même que les coïncidences des deux premiers harmoniques nous ont conduits aux consonnances naturelles de l'octave et de la quinte, nous pouvons trouver une série plus développée d'intervalles naturels consonnants, en produisant les coïncidences des harmoniques supérieurs. Il faut seulement remarquer que, lorsque ces harmoniques supérieurs deviennent plus faibles, on entend s'affaiblir, dans la même proportion, les battements qui distinguent l'intervalle juste de l'intervalle faux. Aussi, la délimitation des intervalles, fondée sur la coïncidence des harmoniques supérieurs, sera-t-elle d'autant plus vague et indéterminée pour l'oreille, que ces harmoniques seront plus élevés. Dans le tableau suivant, la première ligne horizontale et la première ligne verticale contiennent les numéros d'ordre des sons partiels qui doivent coïncider ; aux points d'intersection des lignes verticales et horizontales se trouve la dénomination et le rapport de vibrations de l'intervalle correspondant des sons fondamentaux.

Ce dernier rapport est toujours donné immédiatement par les numéros d'ordre des deux sons qui coïncident.

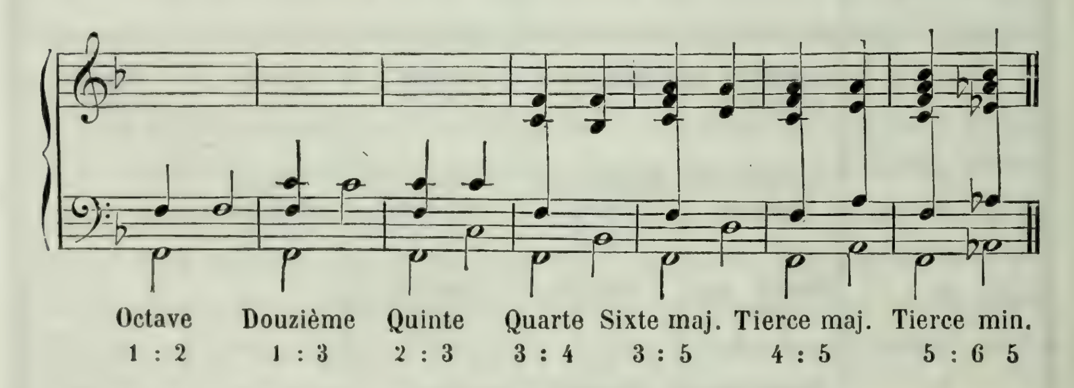
SONS ÉLÉMENTAIRES devant COÏNCIDER.	1	2	3	4	5
6	2 octaves et la quinte.	Douzième. 1 : 3	Octave. 1 : 2	Quarte. 2 : 3	Tierce mineure. 5 : 6
5	2 octaves et la tierce.	Dixième majeure. 2 : 5	Sixte majeure. 3 : 5	Tierce majeure. 4 : 5	
4	Double octave. 1 : 4	Octave. 1 : 2	Quarte. 3 : 4		
3	Douzième. 1 : 3	Quinte. 2 : 3			
2	Octave. 1 : 2				

Les deux dernières lignes horizontales de cette table contiennent les intervalles déjà cités de l'octave, la douzième et la quinte. Dans la troisième, à partir d'en bas, le son 4 vient fournir en outre l'intervalle de quarte et de double octave. Le son 5 détermine la tierce majeure soit simple, soit augmentée d'une ou deux octaves et la sixte majeure. Le son 6 ajoute encore la tierce mineure. J'ai arrêté là le tableau, parce que, sur les instruments de musique dont on peut changer le timbre

dans de certaines limites, comme sur le piano, par exemple, le septième son élémentaire disparaît, ou est au moins très-affaibli. Le sixième aussi est, en général, très-faible, tandis qu'on cherche à favoriser la production des sons partiels jusqu'au cinquième. Nous reviendrons plus tard encore une fois sur l'intervalle caractérisé par le nombre 7, et sur la sixte mineure, déterminée par le nombre 8. Les intervalles consonnants, en commençant par les plus caractérisés, et passant à ceux pour lesquels les faibles battements des harmoniques supérieurs rendent les limites moins nettement tranchées, se présentent donc dans l'ordre suivant :

1.	Octave......................	1 : 2
2.	Douzième....................	1 : 3
3.	Quinte......................	2 : 3
4.	Quarte......................	3 : 4
5.	Sixte majeure...............	3 : 5
6.	Tierce majeure..............	4 : 5
7.	Tierce mineure..............	5 : 6

L'exemple noté qui suit donne les coïncidences des harmoniques respectifs. Les sons fondamentaux sont indiqués encore par des blanches, et les harmoniques par des noires. La série des harmoniques est prolongée jusqu'au premier harmonique commun.



Jusqu'ici nous n'avons jamais parlé que des cas où l'intervalle émis diffère très-peu de l'un des intervalles consonnants naturels. En fait, pour une faible différence, les battements sont lents, et, par suite, faciles à apprécier et à compter. Ils se produisent naturellement aussi quand la distance des harmoniques coïncidents augmente. Toutefois, quand les battements deviennent plus nombreux, leur caractère particulier se trouve dissimulé sous la masse prépondérante des sons fondamentaux, encore plus facilement que cela n'arrive pour les rapides battements de deux sons fondamentaux dissonnants. Plus rapides, ils donnent à toute la masse sonore un certain caractère de dureté, dont l'oreille ne peut facilement arriver à reconnaître la cause, à moins de

diriger l'expérience de manière à accélérer progressivement les battements, en faussant peu à peu l'intervalle ; on peut donc ainsi apprécier, d'une part, tous les interstices des battements susceptibles d'être comptés, et, d'autre part, la dureté d'une dissonnance, tout en s'assurant que les deux sons ne diffèrent que par la hauteur.

Nous avons vu, pour les battements de deux sons simples, que c'était en partie leur distance dans la gamme, en partie leur nombre, qui influaient sur la netteté et la dureté, en sorte que, pour les sons aigus en particulier, c'est le nombre croissant des battements qui faisait que, même pour les intervalles relativement petits, les battements se trouvaient confondus dans la sensation. Ici, où nous avons affaire aux battements des harmoniques qui appartiennent, pour la plupart, aux régions élevées de la gamme si les sons fondamentaux sont émis dans le médium, le nombre des battements exerce une influence prépondérante sur le mordant de l'intervalle.

Quant à la loi qui détermine le nombre des battements d'un intervalle consonnant pour une altération donnée, il est facile de la déduire de la loi démontrée plus haut pour les battements de deux sons simples. Les battements exécutés par deux sons simples, voisins l'un de l'autre, sont, par seconde, en nombre précisément égal à la différence des nombres de vibrations. Supposons, par exemple, qu'un son fondamental fasse 300 vibrations par seconde. Les intervalles harmoniques présentent des vibrations en nombre suivant :

Son fondamental : 300 vibrations.

Octave supérieure	=	600	Octave inférieure	=	150
Quinte	=	450	Quinte	=	200
Quarte	=	400	Quarte	=	225
Sixte majeure	=	500	Sixte majeure	=	180
Tierce majeure	=	375	Tierce majeure	=	240
Tierce mineure	=	360	Tierce mineure	=	250

Admettons maintenant qu'on fausse d'une vibration le son fondamental, de manière qu'il fasse 301 vibrations au lieu de 300 par seconde. En calculant les nombres de vibrations des harmoniques coïncidents et en en prenant la différence, on aura les nombres suivants pour les battements qui prennent alors naissance dans les différents intervalles consonnants.

INTERVALLES SUPÉRIEURS.	SONS PARTIELS BATTANT :		NOMBRE DE BATTEMENTS.
Prime..................	1.300 = 300	1.301 = 301	1
Octave..................	1.600 = 600	2.301 = 602	2
Quinte..................	2.450 = 900	3.301 = 903	3
Quarte..................	3.400 = 1200	4.301 = 1204	4
Sixte majeure..........	3.500 = 1500	5.301 = 1505	5
Tierce majeure.........	4.375 = 1500	5.301 = 1505	5
Tierce mineure.........	5.360 = 1800	6.301 = 1806	6

INTERVALLES INFÉRIEURS.	SONS PARTIELS BATTANT :		NOMBRE DE BATTEMENTS.
Prime..................	1.300 = 300	1.301 = 301	1
Octave..................	2.150 = 300	1.301 = 301	1
Quinte..................	3.200 = 600	2.301 = 602	2
Quarte..................	4.225 = 900	3.301 = 903	3
Sixte majeure..........	5.180 = 900	3.301 = 903	3
Tierce majeure.........	5.240 = 1200	4.301 = 1204	4
Tierce mineure.........	6.250 = 1500	5.301 = 1505	5

Le nombre des battements qui prennent naissance lorsqu'on altère, d'une vibration par seconde, un son d'une des consonnances précédentes, est donc toujours donné par les deux nombres caractéristiques de l'intervalle ; le plus petit nombre donne les battements correspondant à l'altération du son aigu, et le plus grand, les battements correspondant à l'altération du son grave. Cette règle est générale. Ainsi prenons la sixte *ut_la*, dont le rapport numérique est 3 : 5, et faisons faire au *la* une vibration de plus dans un temps donné ; nous obtiendrons dans le même temps 3 battements dans l'intervalle ; si nous faisons faire une vibration de plus à l'*ut*, nous obtenons 5 battements.

Notre calcul et la règle qui s'en déduit prouvent que, pour une même altération de l'un des sons, le nombre des battements des intervalles consonnants, croît dans le même rapport que les nombres qui mesurent ces intervalles. Aussi pour les tierces et les sixtes, si on veut éviter les battements lents, doit-on s'attacher aux rapports normaux d'une manière beaucoup plus précise que pour les octaves et les unissons. Mais, d'un autre côté, par une faible altération de la tierce, on arrive beaucoup plus tôt à la limite où les battements, trop nombreux, commencent à se confondre et perdent leur netteté. Si,

par l'altération d'un son, je change l'unisson ut_3—ut_3 dans le demi-ton si_2—ut_3, j'obtiens une dissonnance aigre formée par 33 battements, nombre qui, comme je l'ai déjà dit, correspond peut-être au maximum de la dureté. Pour fausser la quinte fa_2—ut_3 de 33 battements, je ne dois plus altérer l'ut_3 que d'un quart de ton. Si je l'altérais d'un demi-ton, ce qui donnerait fa_2—si_2, j'aurais 66 battements dont l'aigreur est déjà considérablement diminuée par la confusion des battements. Pour la quinte ut_3—sol_3, l'altération d'un sixième de ton suffit à produire 33 battements ; pour la quarte ut_3—fa_3 il suffit d'un huitième de ton, pour la tierce majeure ut_3—mi_3 et la sixte ut_3—la_3 d'un dixième de ton et, pour la tierce mineure ut_3—$mi\flat_3$ d'un onzième de ton. Inversement, si, dans chacun de ces intervalles je fais varier l'ut_3 de 33 vibrations, de manière qu'il se change en si_2 ou en $ré\flat_3$, j'obtiens les nombres de battements qui suivent :

INTERVALLES.	TRANSFORMATIONS EN	OU EN	VALEUR EN BATTEMENTS.
Octave (ut_3—ut_4)............	si_2—ut_4	$ré\flat_3$—ut_4	66
Quinte (ut_3—sol_3)...........	si_2—sol_3	$ré\flat_3$—sol_3	99
Quarte (ut_3—fa_3)...........	si_2—fa_3	$ré\flat_3$—fa_3	132
Tierce majeure (ut_3—mi_3)....	si_2—mi_3	$ré\flat_3$—mi_3	165
Tierce mineure (ut_3—$mi\flat_3$)..	si_2—$mi\flat_3$	$ré\flat_3$—$mi\flat_3$	198

Or, 99 battements agissent déjà très-faiblement pour deux sons simples, dans les circonstances les plus favorables ; 132 battements paraissent former la limite de ce qu'on peut percevoir ; on ne doit donc pas s'étonner si les mêmes nombres de battements, produits par des harmoniques faibles, couverts par l'intensité prépondérante des sons fondamentaux, ne causent plus une impression appréciable, et disparaissent pour l'oreille. Ce phénomène est néanmoins d'une très-grande importance pour la pratique musicale, car nous trouvons dans notre dernier tableau, comme quinte altérée, l'intervalle si_2—sol_3 qui, sous le nom de *sixte mineure*, est employé comme consonnance imparfaite. Nous trouvons de même comme quarte altérée la tierce majeure $ré\flat_3$—fa_3, comme tierce majeure altérée la quarte si_2—mi_3, etc. Qu'au moins, dans cette région de la gamme, la tierce majeure ne fasse pas entendre les battements d'une quarte altérée, ni la quarte ceux d'une tierce altérée, c'est ce qui s'explique par le grand nombre de battements. Ces intervalles, pris à cette hauteur, résonnent plutôt

au contraire d'une manière parfaitement régulière, sans qu'il y ait trace de battements ou de dureté, toutes les fois qu'ils sont justes.

Nous arrivons ici à l'examen des circonstances qui influent sur la perfection de la consonnance pour les divers intervalles. Nous avons caractérisé les consonnances par la coïncidence de deux harmoniques des deux sons fondamentaux. Quand cette coïncidence a lieu, les deux sons ne peuvent point donner ensemble de battements lents. Mais il peut très-bien arriver, que deux autres harmoniques des deux sons se trouvent assez voisins l'un de l'autre, pour qu'ils donnent ensemble de rapides battements. Les derniers exemples notés présentent déjà des cas de cette nature. Parmi les harmoniques de la tierce majeure fa_0 la_0, se trouvent les deux sons voisins fa_2 et mi_2 ; parmi ceux de la tierce mineure fa_0 $la\flat_0$, les sons la_2 et $la\flat_2$ qui forment entre eux la dissonnance d'un demi-ton, et doivent donner les mêmes battements que si les harmoniques considérés étaient émis directement, comme simples sons fondamentaux. Quoique, en raison de leur nombre, de la faiblesse des sons excitateurs, de la résonnance simultanée des sons fondamentaux et des autres harmoniques, des battements de ce genre ne puissent pas produire une impression très-appréciable, ils ne seront pas cependant sans influence sur la douceur de l'intervalle. Nous avons vu dans le précédent chapitre que, pour certains timbres où les harmoniques supérieurs sont très-développés, il peut se produire, même dans un seul son, des dissonnances dont la dureté est appréciable à l'oreille. Toutes les fois que deux sons de cette nature seront émis simultanément, à ces intervalles dissonnants entre les harmoniques de chaque son, pourront venir se joindre des dissonnances entre les harmoniques respectifs des deux sons, ce qui augmentera nécessairement la dureté dans une certaine mesure.

Si on veut trouver facilement, pour chaque intervalle consonnant, les harmoniques qui forment entre eux des dissonnances, on a un moyen qui se déduit de ce que nous avons dit sur l'altération des intervalles consonnants. Nous avons considéré la tierce comme une quarte altérée, et la quarte comme une tierce altérée. En faisant varier d'un demi-ton la hauteur d'un des sons, nous modifions aussi d'un demi-ton la hauteur de tous ses harmoniques. Les harmoniques qui coïncident dans un intervalle de quarte, s'écartent d'un demi-ton, si on altère la quarte de cette quantité de manière à en faire une tierce ; de même, mais en sens inverse, pour une tierce dont on fait une quarte, comme le montre l'exemple suivant.

Dans la quarte du premier exemple les quatrième et troisième sons partiels coïncident sur le fa_2. Si dans le second exemple on fait descendre la quarte $si\flat$ sur la tierce majeure la_0 ; le troisième son

partiel descend lui-même du fa_2 au mi_2 et forme avec le fa_2 (quatrième son partiel du fa_0), une dissonnance. En revanche les cinquième et sixième sons partiels qui, dans le premier exemple, for-



maient la dissonnance la_2—$si\flat_2$, coïncident ici sur le la_2. De même, la consonnance la_2—la_2 du second cas devient la dissonnance la_2—$la\flat_2$ du troisième cas, tandis que la dissonnance ut_3—$ut\sharp_3$ du deuxième cas, devient, dans le troisième, la consonnance ut_3—ut_3.

Donc, dans tout intervalle consonnant, les harmoniques qui coïncidaient dans les intervalles consonnants voisins, forment une dissonnance, et on peut dire que, dans ce sens-là, toute consonnance est altérée par les consonnances voisines; l'altération croît en raison directe de la gravité et de l'intensité des harmoniques dont la coïncidence caractérise l'intervalle voisin, ou, ce qui revient au même, en raison inverse des nombres formant le rapport numérique de vibrations.

Le tableau suivant donne un aperçu de cette influence réciproque des diverses consonnances les unes sur les autres. On a pris les harmoniques jusqu'au neuvième, et on a donné des noms à chacun des intervalles formés par la coïncidence des harmoniques élevés. La troisième colonne contient le rapport des nombres de vibrations, qui donnent en même temps le numéro d'ordre des sons partiels coïncidants. La quatrième colonne donne les distances respectives des intervalles entre eux, et la dernière donne le calcul fait, pour le timbre du violon, de l'intensité relative des battements qui prennent naissance dans l'altération de l'intervalle considéré. Plus le nombre de cette dernière colonne est grand, et plus l'intervalle correspondant agit sur ses voisins.

TABLEAU.

INTERVALLES.	NOTATION.	RAPPORTS de VIBRATIONS.	DISTANCES RESPECTIVES.	CHIFFRE de L'INFLUENCE.
Prime.............	*ut*	1 : 1		100
			8 : 9	
Seconde............	*ré*	8 : 9		1,4
			63 : 64	
Seconde augmentée. .	*ré* +	7 : 8		1,8
			48 : 49	
Tierce diminuée.....	*mi*♭ —	6 : 7		2,4
			35 : 36	
Tierce mineure......	*mi* ♭	5 : 6		3,3
			24 : 25	
Tierce majeure......	*mi*	4 : 5		5,0
			35 : 36	
Tierce augmentée....	*mi* +	7 : 9		1,6
			27 : 28	
Quarte.........	*fa*	3 : 4		8,3
			20 : 21	
Quinte diminuée.....	*sol*♭ —	5 : 7		2,8
			14 : 15	
Quinte.............	*sol*	2 : 3		16,7
			15 : 16	
Sixte mineure.......	*la* ♭	5 : 8		2,5
			24 : 25	
Sixte majeure..	*la*	3 : 5		6,7
			20 : 21	
Septième diminuée. .	*si*♭ —	4 : 7		3,6
			35 : 36	
Septième mineure. ..	*si*♭	5 : 9		2,2
			9 : 10	
Octave.............	*ut*	1 : 2		50

La consonnance la plus parfaite est la *prime* ou l'*unisson*, où les deux sons ont la même hauteur. Tous les harmoniques coïncident, et, par conséquent, l'émission simultanée des deux sons ne peut ajouter aucune dissonnance à celles qui existaient déjà dans chacun d'eux.

Les choses se passent d'une manière analogue pour l'octave : tous les sons partiels de la note supérieure de cet intervalle coïncident avec les sons partiels pairs de la note grave qu'ils renforcent, en sorte qu'encore ici, les harmoniques ne peuvent donner lieu à aucune dissonnance qui n'existerait pas déjà, quoique plus faible, dans la note grave. Un son accompagné de son octave, prend un timbre un peu plus mordant, lorsque les harmoniques qui donnent le mordant au timbre sont en partie renforcés par l'addition de cette octave, mais cette action se produirait de même si on se bornait à faire croître l'intensité du son fondamental de l'intervalle sans y ajouter l'octave. Dans ce dernier cas seulement, le renforcement serait distribué d'une manière un peu différente entre les divers harmoniques.

La même chose a lieu pour la *douzième*, la *seconde octave*, en général, pour tous les cas où le son supérieur de l'intervalle coïncide avec l'un des harmoniques du son inférieur ; il faut remarquer seu-

lement que, pour un écart croissant des deux sons, la différence entre la consonnance et la dissonnance devient de moins en moins sensible.

Les intervalles considérés jusqu'ici, où le son supérieur coïncide avec l'un des harmoniques du son inférieur, peuvent s'appeler *consonnances absolues*. Le second son n'apporte ici rien de nouveau, il ne fait que renforcer certains éléments du premier.

La prime et l'octave agissent considérablement sur les intervalles voisins, par les consonnances qui s'y transforment en dissonnances ; ainsi la seconde mineure *ut—ré*♭ et la septième majeure *ut—si*, différant chacune d'un demi-ton de la prime ou de l'octave, sont les dissonnances les plus dures de nos gammes. La seconde majeure *ut—ré* et la septième mineure *ut—si*♭, différant d'un ton entier des intervalles en question, doivent encore être rangées parmi les dissonnances, mais, en raison de l'écart plus grand des éléments dissonnants, elles sont beaucoup plus douces que les précédentes. Dans les régions supérieures de la gamme surtout, leur dureté diminue beaucoup à cause du grand nombre de leurs battements. Comme la septième mineure doit sa dissonnance au premier harmonique, plus faible que le son fondamental dans la plupart des timbres musicaux, elle présente une dissonnance plus douce encore que celle de la seconde majeure, et doit être placée sur la limite des intervalles dissonnants.

Cherchons encore d'autres bonnes consonnances contenues dans l'octave ; c'est la quinte qui se présente à nous en premier lieu. Dans notre dernier tableau, elle n'a immédiatement à côté d'elle, à une distance d'un demi-ton, que les intervalles 5 : 7 et 5 : 8, dont les coïncidences ne peuvent agir que faiblement ou presque pas, parce que, dans les meilleurs timbres, le septième et le huitième son partiels ne sonnent que très-peu ou manquent totalement. Les intervalles les plus voisins présentant de forts harmoniques sont la quarte 3 : 4, et la sixte majeure 3 : 5. Mais ici l'écart est d'un ton entier, et si, déjà pour cette distance, les sons 1 et 2 de l'intervalle d'octave ne peuvent augmenter que dans une faible proportion la dissonnance de la septième mineure, l'action des sons 2 et 3, c'est-à-dire du voisinage des coïncidences de la quinte, sur la quarte ou la sixte majeure, est naturellement insignifiante, et, réciproquement, l'action des coïncidences des deux intervalles 3 : 4 ou 3 : 5 sur la quinte est tout à fait négligeable. La quinte demeure donc une consonnance parfaite dans laquelle les dissonnances des harmoniques très-rapprochés ne peuvent apporter aucun trouble appréciable ; seulement, pour les timbres mordants (harmonium, contre-basse, violoncelle, registre à anche de l'orgue) qui présentent des harmoniques élevés, et dans les régions très-graves, si le nombre des battements est faible, on remar-

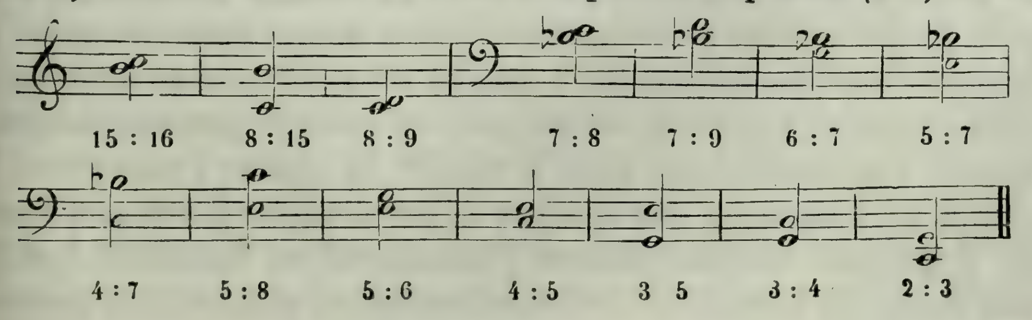
que que la quinte présente un peu plus de dureté que l'octave. Aussi la quinte est-elle considérée comme une consonnance depuis la plus haute antiquité, et par tous les musiciens. En revanche les intervalles immédiatement voisins de la quinte sont ceux qui, après les intervalles voisins de l'octave, forment les plus aigres dissonnances. En particulier, les intervalles situés entre la quarte et la quinte, discordant d'un côté par les sons 2 et 3, de l'autre par les sons 3 et 4, sont encore plus dissonnants que ceux situés entre la quinte et la sixte majeure, parce qu'ici la dissonnance est produite par le son 5, plus faible que le son 4 agissant pour les premiers. Aussi les intervalles situés entre la quarte et la quinte, ont-ils été constamment considérés comme des dissonnances dans la pratique musicale ; entre la quinte et la sixte majeure se trouve l'intervalle de sixte mineure, traité comme consonnance imparfaite, et qui doit cet avantage moins à sa douceur, qu'à la propriété d'être le renversement de la tierce majeure ; en effet, sur les instruments à clavier, les deux mêmes touches peuvent représenter, selon le ton, tantôt la consonnance *ut*–*la*♭, tantôt la dissonnance *ut*–*sol*♯.

Immédiatement après la quinte, viennent les consonnances de quarte 3 : 4 et de sixte majeure 3 : 5, dont les éléments dissonnants sont généralement formés en grande partie par les coïncidences de la quinte. La distance entre la quarte et la quinte (intervalle 8 : 9) est un peu plus grande qu'entre la quinte et la sixte (intervalle 9 : 10) ; aussi cette dernière est-elle une consonnance moins parfaite que la quarte. Celle-ci, cependant, a, tout près d'elle, la tierce majeure caractérisée par la coïncidence du quatrième et du cinquième son partiels ; si ces derniers présentent une grande intensité, cette supériorité de la quarte peut disparaître. On sait aussi qu'il y a eu longtemps, entre les musiciens de l'antiquité, discussion sur la nature de la quarte, pour savoir si c'était une consonnance ou une dissonnance. La position privilégiée donnée à la quarte, avant la sixte majeure et la tierce majeure, doit être attribuée plutôt à la circonstance que la quarte est le renversement de la quinte, qu'à la douceur propre de cet intervalle. La quarte et la sixte, majeure ou mineure, deviennent moins bonnes lorsqu'on prend à l'octave le son supérieur, parce que, dans ce cas, elles se trouvent dans le voisinage de la douzième, et que, par conséquent, elles sont altérées dans une plus forte proportion par les coïncidences de la douzième 1 : 3, et des intervalles voisins 2 : 5 et 2 : 7, qui agissent plus que les coïncidences de 4 : 5 et 4 : 7 de l'octave inférieure.

Viennent ensuite, dans la série des consonnances, la tierce majeure et la tierce mineure. Cette dernière, dans les cas où le sixième son partiel est faiblement développé, comme dans les pianos moder-

nes, n'est encore que très-imparfaitement délimitée, parce qu'en la faussant, on ne produit que des battements à peine encore appréciables. La tierce mineure est exposée d'une manière encore appréciable à l'influence du son fondamental, la tierce majeure à celle des coïncidences de la quarte ; en outre, par leurs coïncidences respectives, ces deux intervalles de tierce se nuisent réciproquement, ce qui fait que la tierce mineure est moins bonne que la tierce majeure. Aussi, pour la douceur de ces deux intervalles, est-il essentiel que le nombre des battements qui viennent en altérer la pureté soit considérable. Dans les régions élevées de la gamme, les tierces sont bonnes et parfaitement pures ; dans le bas, au contraire, elles présentent de la dureté. L'antiquité tout entière s'est refusée à les reconnaître comme consonnances, et on ne commence à en faire des *consonnances imparfaites* que depuis Franco de Cologne (fin du douzième siècle). La chose s'explique par ce fait que, chez les peuples classiques et au moyen âge, la théorie de la musique s'est développée principalement en se fondant sur les chants des voix d'hommes ; dans ces régions graves, en réalité, les tierces ne sonnent pas particulièrement bien. De là vient aussi qu'on ne connaissait pas de tierce vraiment juste, et que, jusque vers la fin du moyen âge, on a considéré comme normale la tierce dite *pythagoricienne* 64 : 81.

J'ai déjà insisté sur l'influence importante qu'exerce sur l'harmonie des consonnances, surtout des consonnances imparfaites, le nombre des faibles battements des harmoniques dissonnants. Si nous donnons à tous les intervalles le même son fondamental, les nombres de battements sont très-différents, et beaucoup plus grands pour les consonnances imparfaites que pour les consonnances parfaites. Mais nous pouvons prendre dans la gamme tous les intervalles cités à des hauteurs telles, que le nombre des battements soit le même pour tous. Comme nous avons trouvé pour les sons simples que le maximum de dureté correspond à environ 33 battements par seconde, j'ai réuni dans l'exemple noté ci-dessous tous les intervalles pris à la hauteur nécessaire pour donner 33 battements par seconde. On les suppose appartenant à la gamme naturelle, dans le ton d'*ut* majeur. Le son *si*♭ doit être considéré comme la septième trop basse (4:7) de *ut*.



Les sons, dans cet exemple, sont tous des harmoniques de l'*ut*$_{-1}$ de 33 vibrations, par conséquent, leurs nombres propres de vibrations et ceux de leurs harmoniques sont tous égaux au produit de 33 par des nombres entiers ; les différences, c'est-à-dire les nombres de battements, seront donc elles-mêmes 33, 66, ou un multiple supérieur de 33.

Dans les régions graves ici indiquées, les battements déterminés par les harmoniques dissonnants agissent autant que le comporte leur intensité ; c'est ce qui fait que les sixtes, les tierces et même la quarte sont assez dures. Ici cependant la sixte majeure et la tierce majeure montrent leur supériorité sur la sixte mineure et la tierce mineure, en ce qu'elles peuvent descendre plus bas dans la gamme, tout en conservant encore un peu plus de douceur. C'est une règle pratique, généralement connue par les musiciens, qu'il faut éviter dans les régions graves ces petits intervalles, si on veut avoir des accords résonnant avec douceur ; jusqu'ici on n'avait pu rendre compte de cette règle dans les traités d'harmonie.

La théorie de l'audition, précédemment donnée, permettrait, au moyen de la vibration par influence des prolongements nerveux, de calculer l'intensité des battements des divers intervalles, connaissant l'intensité des harmoniques dans les timbres considérés de l'instrument employé, en supposant les intervalles pris à des hauteurs telles qu'ils présentent tous le même nombre de battements. Le calcul donne des résultats différents pour les différents timbres, et ne s'applique qu'à chacun des cas particuliers.

Pour les intervalles construits sur un même son fondamental, vient encore s'ajouter un nouveau facteur, à savoir, le nombre de battements, dont l'influence sur la dureté de la sensation ne peut encore s'exprimer directement par une loi bien précise. Pour pouvoir représenter ces phénomènes compliqués par une construction graphique, qui en apprend plus d'un coup d'œil que les descriptions les plus compliquées, j'ai fait un calcul de ce genre, et construit les deux figures 52 A et B. Dans ce but, je devais cependant admettre une loi arbitraire pour représenter la relation existant entre la dureté et le nombre de battements. J'ai choisi la formule mathématique la plus simple possible pour exprimer que la dureté disparaît quand le nombre des battements est égal à zéro, qu'elle atteint son maximum pour 33 battements, et décroît ensuite pour un nombre croissant de battements. J'ai calculé alors, pour le timbre du violon, l'intensité et la dureté des battements que donnent les harmoniques pris deux à deux, et, d'après les résultats obtenus, j'ai construit les figures 52 A et B. Les lignes de base *c'c''* et *c''c'''* représentent la portion de la gamme

comprise entre les notes de même nom, mais sont prises de telle sorte que la hauteur varie d'une manière continue et non par degrés. On a admis en outre que les sons correspondant à chacun des points de la gamme, sonnent en même temps que le son ut_2 qui forme la base constante de tous les intervalles. La figure 52 A indique donc la

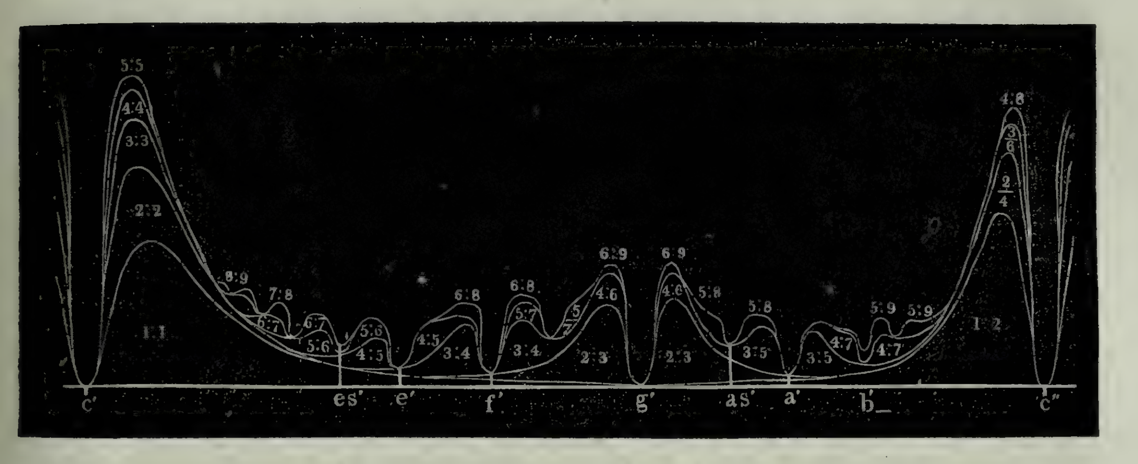


Fig. 52 A.

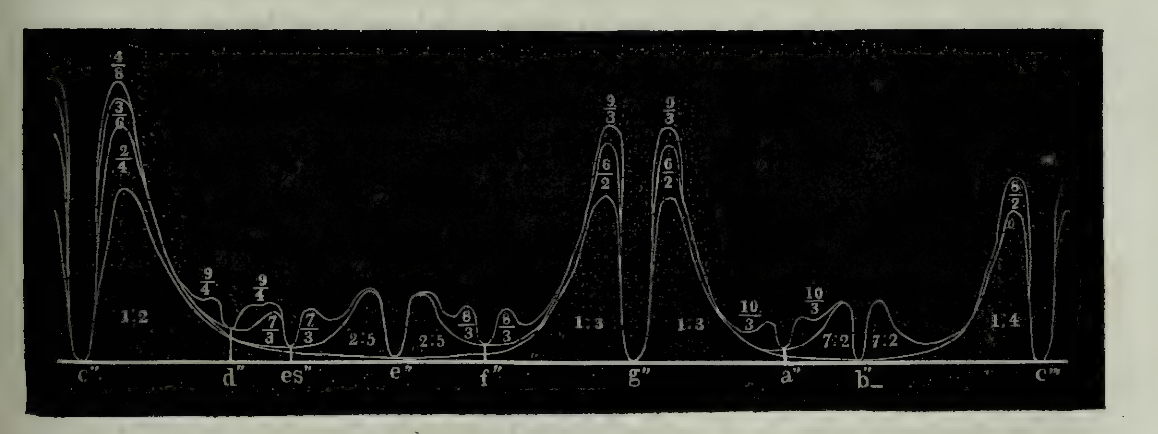


Fig. 52 B.

dureté des intervalles plus petits qu'une octave, la figure 52 B celle des intervalles qui, plus grands qu'une octave, sont moindres que deux octaves. Des éminences s'élèvent sur les lignes horizontales de base, et sont désignées par les numéros d'ordre des deux harmoniques. La hauteur de ces éminences, en chaque point de leur étendue, est prise égale à la dureté provenant des deux harmoniques indiqués par les chiffres, lorsque le son de hauteur correspondante est associé à l'ut_2. Les duretés produites par les divers harmoniques se superposent les unes aux autres. On voit ici comment les différentes duretés, provenant des divers harmoniques, prennent les unes sur les autres; on voit aussi qu'il ne reste qu'un petit nombre d'étroites vallées, correspondant aux positions des meilleures consonnances, dans lesquelles

la dureté de l'ensemble est relativement faible. Les vallées les plus profondes correspondent dans la première octave ut_2-ut_3, à l'octave ut_3 et à la quinte sol_2; viennent ensuite la quarte fa_2, la sixte majeure la_2, la tierce majeure mi_2, dans l'ordre où nous avons déjà trouvé ces intervalles. La tierce mineure $mi\flat_2$ et la sixte mineure $la\flat_2$ présentent déjà une plus grande hauteur correspondant à la dureté plus grande de ces intervalles : tout près d'eux sont les intervalles formés avec le nombre 7, 4 : 7, 5 : 7, 6 : 7.

Dans la seconde octave, on voit s'améliorer en général les intervalles de la première octave, dont l'expression numérique a comme plus faible terme un nombre pair; ainsi la douzième 1 : 3, la dixième 2 : 5, la septième diminuée 2 : 7 et la tierce diminuée 3 : 7 sont plus pures que la quinte 2 : 3, la tierce majeure 4 : 5, et les intervalles 4 : 7 et 6 : 7. Les autres intervalles deviennent relativement plus mauvais. La onzième, ou la quarte augmentée d'une octave, se trouve placée à côté de la dixième, la treizième ou la sixte plus une octave, à côté de la septième diminuée; la tierce mineure et la sixte mineure, augmentées d'une octave, se trouvent dans des positions encore moins favorables, à cause de l'action exercée par les coïncidences des intervalles voisins. Ces conséquences du calcul sont facilement confirmées par l'expérience sur des instruments justes ; elles ont même été prises en considération dans la pratique musicale, quoique, d'après la théorie ordinaire, on admette que la nature d'un accord ne varie pas quand on élève d'une octave l'un de ses sons ; c'est ce que nous verrons plus tard dans la théorie des accords et deleurs renversemen ts.

On a déjà dit que la nature particulière de chaque timbre doit modifier considérablement l'ordre dans lequel se succèdent les intervalles harmonieux. Le timbre des instruments, aujourd'hui en usage, a été naturellement déterminé et modifié en vue de son emploi dans les combinaisons harmoniques. L'étude des timbres de nos principaux instruments nous a fait voir que, dans un timbre agréable à l'oreille, l'intensité devait être considérable pour l'octave et la douzième du son fondamental, modérée pour le troisième et le quatrième son partiels, mais rapidement décroissante pour les harmoniques supérieurs.

En admettant un timbre de ce genre, nous pouvons résumer ainsi qu'il suit les résultats du présent chapitre.

Si deux sons musicaux résonnent simultanément, l'accord qu'ils forment est en général troublé par les battements que produisent entre eux les harmoniques respectifs des deux sons, en sorte qu'une plus ou moins grande portion de la masse sonore se divise en secousses discontinues, et l'accord devient dur. Nous donnons à ce phénomène le nom de *dissonnance*.

Mais, pour certains rapports déterminés entre les nombres de vibrations, il se produit une exception à cette règle : il n'y a pas de battements, ou bien ceux qui se forment sont assez faibles dans l'oreille, pour n'exercer aucune action désagréable sur l'accord. Nous appelons *consonnances* ces cas exceptionnels.

1. Les consonnances les plus parfaites sont celles que nous avons appelées consonnances *absolues*, et où le son fondamental de l'une des notes coïncide avec l'un des harmoniques de l'autre. A cette catégorie appartiennent l'*octave*, la *douzième* et la *double octave*.

2. Viennent ensuite la quinte et la quarte, que nous pouvons appelons *consonnances parfaites*, parce qu'elles peuvent être employées dans toutes les régions de la gamme, sans altération sensible de l'harmonie de l'intervalle. La quarte est moins parfaite comme consonnance que la quinte ; elle se rapproche des consonnances du groupe suivant. Elle ne présente guère d'autre avantage essentiel, dans la pratique, que d'être le complément de la quinte pour former l'octave ; nous y reviendrons dans un prochain chapitre.

3. Le groupe suivant est formé de la sixte majeure et de la tierce majeure, que nous pouvons appeler *consonnances moyennes*. Les anciens harmonistes ne les considéraient que comme des consonnances imparfaites. L'altération de l'harmonie de l'intervalle est déjà très-appréciable dans le grave, mais disparaît dans le haut, parce que les battements trop nombreux se confondent. Dans les bons timbres musicaux, ces deux intervalles ont encore la propriété d'être bien caractérisés par eux-mêmes, parce que le moindre écart de la justesse produit dans les harmoniques des battements appréciables ; aussi ces deux intervalles se distinguent-ils nettement des intervalles voisins.

4. Quant aux consonnances imparfaites de la tierce mineure et de la sixte mineure, elles ne sont plus, en général, caractérisées par elles-mêmes, parce que les harmoniques extrêmes manquent souvent pour la tierce, et ordinairement pour la sixte, dans les bons timbres ; aussi de petits écarts de la justesse n'entraînent-ils pas ici nécessairement des battements. Ces intervalles sont d'un emploi encore moins avantageux que les précédents dans les régions graves ; et, s'ils ont été préférés comme consonnances à beaucoup d'autres intervalles situés à la limite entre les consonnances et les dissonnances, ils le doivent essentiellement à cette circonstance, qu'ils forment le complément pour obtenir l'octave ou la quinte de la sixte et de la tierce majeure. La septième diminuée 4 : 7 est très-souvent plus harmonieuse que la sixte mineure ; c'est ce qui arrive toujours, en particulier, lorsque le second harmonique est relativement fort, comparé au premier ; par ses coïncidences la quinte exerce alors, sur les intervalles qui n'en diffèrent

que d'un demi-ton, une action perturbatrice plus forte que celle de l'octave sur la septième mineure qui en diffère d'un ton entier. Mais cette septième diminuée, unie à d'autres consonnances dans les accords, produit des intervalles beaucoup plus mauvais qu'elle-même, 6 : 7, 5 : 7, 7 : 8, etc. ; aussi, dans la musique actuelle, n'est-elle pas employée comme consonnance.

5. En augmentant les intervalles précédents d'une octave, on améliore la quinte et la tierce majeure qui deviennent la douzième et la dixième majeure. La quarte et la sixte majeure se transforment en onzième et treizième, intervalles moins bons ; les plus mauvais sont la tierce mineure et la sixte qui deviennent la dixième mineure et la treizième ; aussi ces dernières sont-elles, comme douceur, bien inférieures aux intervalles 2 : 7 et 3 : 7.

En formant la série des consonnances précédemment énumérées, on n'a considéré que l'harmonie de chaque intervalle pris isolément, en soi, et sans rapport avec les autres ; c'est-à-dire que tout ce qui concerne le mode, le ton et les modulations a été laissé de côté. Presque tous les théoriciens ont admis, pour les consonnances, des séries qui, par leurs traits principaux, concordaient entre elles et avec la théorie que nous avons déduite des battements. Ainsi, partout, l'unisson et l'octave sont considérés comme les consonnances les plus parfaites ; viennent ensuite la quinte pour tous les harmonistes, puis la quarte, au moins chez ceux qui ne considèrent pas les propriétés modulatrices de cet intervalle, et qui se bornent à l'observation de l'harmonie de l'intervalle isolé. C'est dans la classification des tierces et des sixtes qu'on trouve au contraire une grande diversité. Chez les Grecs et les Romains, ces intervalles n'étaient généralement pas considérés comme des consonnances, soit à cause de leur mauvais effet dans l'octave d'indice 1 où se mouvaient le plus souvent les chants écrits pour voix d'hommes, soit que leur oreille fût trop sensible pour supporter même le faible accroissement de dureté que présentent deux sons émis simultanément à la tierce ou à la sixte. A une époque plus récente, l'archevêque Chrysanthus de Dyrrhachium assure que les Grecs modernes n'avaient aucun goût pour la musique à plusieurs parties ; aussi, dans son livre sur la musique, dédaigne-t-il généralement de s'étendre sur ce sujet, et renvoie-t-il aux écrits de l'Occident ceux qui, par curiosité, voudraient en apprendre les règles (1). A en croire les récits de tous les voyageurs, il en est de même chez les Arabes.

Cette règle subsista encore pendant la première moitié du moyen

(1) Θεορητικὸν μέγα τῆς Μουσικῆς παρὰ Χρυσανθοῦ. Τεργεστῆ, 1832, cité par Coussemaker, *Histoire de l'harmonie*, p. 5.

âge, lorsqu'on commençait déjà à faire les premiers essais de musique à deux voix. C'est vers la fin du douzième siècle, que Franco de Cologne comprit pour la première fois les tierces parmi les consonnances. Il distingue :

1. Des consonnances parfaites : unisson et octave ;
2. Des consonnances moyennes : quinte et quarte ;
3. Des consonnances imparfaites : tierces majeure et mineure ;
4. Des dissonnances imparfaites : sixtes majeure et mineure ;
5. Des dissonnances parfaites : seconde mineure, quarte augmentée, septièmes majeure et mineure (1).

C'est aux treizième et quatorzième siècles qu'on commença à ranger aussi les sixtes parmi les consonnances. Philippe de Vitry et Jean de Muris (2) considérèrent, outre l'unisson, les octaves et les quintes comme des consonnances parfaites, les tierces et les sixtes comme des consonnances imparfaites. La quarte est omise. D'ailleurs, d'après les anciens auteurs, la tierce et la sixte majeures sont plus parfaites que les intervalles mineurs de même nom. La même classification se trouve dans le *Dodecachordon* de Glareanus (1557), qui se borne à y ajouter les intervalles augmentés d'une octave. Quant à l'omission de la quarte parmi les consonnances parfaites ou imparfaites, elle s'explique par les règles de la conduite des voix. Avec les mêmes voix, on ne pouvait pas faire une succession de consonnances parfaites et encore moins de dissonnances ; mais cette succession était admissible pour des consonnances imparfaites comme les tierces et les sixtes. D'une part, cependant, les consonnances parfaites, les octaves et les quintes, pouvaient figurer dans les accords destinés à former des repos, par exemple dans l'accord final. La quarte du son fondamental ne pouvait convenir à cet accord, parce qu'elle n'entre pas dans l'accord parfait. D'autre part, on ne pouvait pas non plus faire exécuter à deux voix une succession de quartes, cet intervalle étant trop voisin de la quinte. Sous le rapport de la conduite des voix, la quarte partageait donc les propriétés des dissonnances, et on la rangeait parmi elles, au lieu d'en faire, ce qui eût été plus exact, un degré intermédiaire entre les consonnances parfaites et imparfaites. En ce qui concerne l'harmonie de l'intervalle, il ne peut y avoir aucun doute : la quarte est supérieure aux tierces et sixtes majeures dans la plupart des timbres, et toujours préférable aux tierces et sixtes mineures. La quarte augmentée d'une octave, la onzième, sonne assez mal en raison de l'intensité relativement grande du second harmonique.

(1) Gerbert, *Scriptores ecclesiastici de Musicâ sacrâ*, S. Blaise, 1784, t. III, p. 2. — Coussemaker, *Histoire de l'harmonie*, Paris, 1852, p. 49.

(2) Coussemaker, *loc. cit.*, p. 66 et 68.

La discussion sur la consonnance ou la dissonnance de la quarte s'est prolongée jusqu'à ces derniers temps. On voit encore dans l'*Harmonie* de Dehn, parue en 1840, qu'il faut traiter et résoudre cet intervalle comme une dissonnance. Mais Dehn donne à la question en litige un tout autre sens, lorsqu'il prescrit de traiter comme dissonnance la quarte de chaque tonique, dans la gamme de laquelle se meut l'harmonie ; et indépendamment des intervalles qui l'accompagnent. Dans la musique moderne, au contraire, c'est une chose constamment usitée que de faire intervenir la quarte de la quinte, ou l'octave du son fondamental, dans l'accord final, où on l'a même employée longtemps avant qu'on osât y mettre des tierces ; c'est ce qui prouve que la quarte est considérée comme une des meilleures consonnances.

CHAPITRE XI

BATTEMENTS DES SONS RÉSULTANTS.

Lorsque deux ou plusieurs sons résonnent simultanément, outre les battements des harmoniques, il peut encore se produire des battements dus à l'action des sons résultants. Dans le septième chapitre, on a démontré que le plus fort son résultant est celui qui présente des vibrations en nombre égal à la différence des nombres de vibrations des sons primaires, ou le différentiel du premier ordre. C'est celui qui doit entrer principalement en considération pour la production des battements. Ce premier son résultant est déjà assez faible, si les deux sons primaires ne présentent pas une intensité considérable ; à plus forte raison en est-il de même pour les sons résultants d'ordre supérieur et pour les additionnels. Les battements produits par ces faibles sons ne peuvent entrer en considération, qu'en l'absence de tous les autres battements qui pourraient en empêcher l'observation, c'est-à-dire dans le cas de l'émission simultanée de deux sons simples entièrement dépourvus d'harmoniques. Au contraire, les battements des premiers différentiels peuvent très-bien s'entendre même à côté de ceux des harmoniques, pourvu qu'on se soit exercé à entendre les sons résultants.

Les *sons différentiels du premier ordre* peuvent produire des battements seuls et par eux-mêmes, sans qu'ils soient accompagnés de sons résultants d'ordre supérieur :

1° Dans le cas de deux sons simultanés pourvus d'harmoniques ;

2° Dans le cas de l'émission simultanée de trois ou plusieurs sons simples ou composés. Les *sons résultants d'ordre supérieur* ne peuvent au contraire entrer en considération pour la production des battements, que dans le cas de l'émission simultanée de deux sons simples.

Commençons par les sons fournis par des sons complexes différentiels du premier ordre. De même que les deux sons fondamentaux, les harmoniques pris arbitrairement deux à deux donnent aussi des sons résultants qui, naturellement, s'affaiblissent dans le même rapport que les harmoniques qui leur donnent naissance. Si un ou plusieurs de ces sons résultants tombent dans le voisinage soit des

autres, soit des sons fondamentaux primaires ou des harmoniques, il se produit des battements. Prenons comme exemple une quinte un peu fausse, dont les nombres de vibrations seraient 200 et 301 au lieu de 200 et 300 que donnerait la quinte juste. Nous calculons les nombres de vibrations des harmoniques en multipliant par 1, 2, 3, etc., ceux des sons fondamentaux. Nous trouvons les nombres de vibrations des premiers différentiels, en retranchant deux à deux l'un de l'autre les nombres précédemment obtenus. Le tableau suivant contient dans la première colonne horizontale et dans la première colonne verticale, les sons partiels des deux sons complexes, et, dans la partie moyenne, les différences entre leurs nombres de vibrations, correspondant aux sons résultants :

SONS PARTIELS du SON FONDAMENTAL.	SONS PARTIELS DE LA QUINTE.			
	301	602	903	
200	101	402	703	SONS RÉSULTANTS.
400	99	202	503	
600	299	2	303	
800	499	198	103	
1000	699	398	97	

En rangeant les sons résultants d'après leur hauteur, nous trouvons les groupes suivants :

2	99	200	301	400	600	699
	101	202	299	402	602	703
	103	198	303	398		
	97					

Le nombre 2 est trop faible pour correspondre à un son résultant; il indique seulement le nombre des battements des deux harmoniques 600 et 602. Dans tous les autres groupes, se trouvent réunis des sons dont les nombres de vibrations diffèrent de 2, 4 ou 6, et qui, par conséquent, donnent entre eux 2, 4 ou 6 battements pendant que les harmoniques considérés en font 2. Parmi les sons résultants, les plus intenses sont les deux sons 101 et 99, qui tous deux se distinguent plus facilement des autres par leur position grave.

Nous remarquerons, dans notre exemple, que les battements les plus lents que donnent les sons résultants sont en nombre égal à ceux pro-

venant des harmoniques. C'est là une règle générale qui s'applique à tous les intervalles.

De plus, il est facile de voir que si, au lieu des nombres 200 et 301, nous avions pris ceux de la quinte juste, 200 et 300, tous les nombres du tableau se réduiraient à des multiples de 100, de telle manière que les harmoniques et les différents sons résultants, venant à coïncider, ne donneraient point de battements. Ce que nous disons ici de la quinte s'applique ici d'une manière générale à tous les intervalles harmoniques (1).

Les premiers différentiels de sons complexes ne donnent jamais de battements qu'en même nombre et dans les mêmes circonstances que les harmoniques des sons considérés, en supposant que leur série soit complète. Il s'ensuit que les résultats trouvés dans le précédent chapitre sur l'action des battements, ne sont pas essentiellement altérés par la considération des sons résultants. L'intensité des battements est seulement un peu augmentée peut-être.

Il en est tout autrement, au contraire, dans l'émission simultanée de deux sons simples entièrement dépourvus d'harmoniques. En ne tenant pas compte des sons résultants, les deux sons simples de deux diapasons ou de deux tuyaux bouchés, ne pourraient donner de battements que s'ils étaient assez voisins l'un de l'autre. Ces battements sont énergiques si l'intervalle ne dépasse pas une seconde, mineure ou majeure ; ils sont faibles et perceptibles seulement dans le grave, pour une tierce, et diminuent en netteté au fur et à mesure que l'intervalle s'agrandit, sans communiquer à certains intervalles des propriétés particulières. Pour tout intervalle plus grand de deux sons simples, les battements feraient absolument défaut en l'absence complète d'harmoniques et de sons résultants ; par suite les intervalles consonnants trouvés dans le précédent chapitre ne différeraient en rien des intervalles voisins ; il n'y aurait donc, d'une manière générale, aucune différence entre les grands intervalles consonnants ou dissonnants.

Cependant les intervalles plus grands que la tierce formés par des sons simples peuvent donner des battements, quoique beaucoup plus faibles que ceux précédemment considérés ; ils peuvent aussi se distinguer en consonnances et en dissonnances, quoique d'une manière beaucoup plus imparfaite que si les sons étaient complexes ; cela vient, comme l'a montré Scheibler, des sons résultants d'ordre supérieur.

Pour l'octave, il suffit du premier différentiel. Si le son fondamental fait 100 vibrations, et l'octave 201, le premier différentiel en fera 201—100 ou 101, et se trouvera par conséquent dans le voisinage du

(1) Voir la démonstration mathématique, Supplément XIV.

son fondamental avec lequel il donnera un battement par 100 vibrations. Ces battements s'entendent sans difficulté, et, grâce à eux, on peut facilement, même pour des sons simples, distinguer l'octave juste de l'octave fausse.

Pour la quinte, le son résultant du premier ordre ne suffit plus. Prenons pour une quinte fausse le rapport numérique de 200 à 301 ; le son résultant du premier ordre fera 101 vibrations, mais sera trop éloigné de chacun des sons primaires pour donner avec eux des battements. Mais il forme, avec le son 200, une octave fausse qui donne des battements, comme nous venons de le voir. Ils proviennent de ce que le son 101 forme avec le son 200 un nouveau son résultant 99, qui donne deux battements avec le son 101. Ces battements permettent de distinguer la quinte fausse de la quinte juste et sont en nombre précisément égal à ceux que produiraient les harmoniques. Pour qu'il soit possible d'observer ces battements, les sons primaires doivent déjà présenter une certaine intensité, et on ne doit être troublé par aucun bruit étranger. Mais, dans des conditions favorables, il n'est pas difficile de les entendre.

Dans la quarte fausse, dont les vibrations seraient dans le rapport de 300 à 401, le premier son résultant présente 101 vibrations, il donne avec le son 300, le différentiel de deuxième ordre 199, et ce dernier présente avec le son 401 la différence 202, comme son résultant du troisième ordre qui donne, avec le différentiel du deuxième ordre 199,3 battements, c'est-à-dire le même nombre que donneraient les harmoniques 1200 et 1203 des deux sons primaires s'ils existaient. Ces battements de la quarte sont déjà très-faibles, même avec des sons primaires intenses. Pour les observer, il faut être dans le plus grand calme et apporter une grande attention.

C'est à peine si on peut encore percevoir, même dans les conditions les plus favorables, les battements de la tierce majeure fausse. Prenons pour nombres de vibrations des sons primaires 400 et 501, on a :

501 — 400 = 101,	son résultant	du	1er ordre,
400 — 101 = 299	—	—	2e ordre,
501 — 299 = 202	—	—	3e ordre.
400 — 202 = 198	—	—	4e ordre.

Les sons 202 et 198 donnent 4 battements. Scheibler a encore compté ces battements de la tierce majeure fausse ; moi-même, dans les conditions les plus favorables, j'ai cru les entendre encore d'une manière douteuse ; leur perception cependant est tellement difficile qu'ils ne peuvent plus entrer en considération dans la détermination de la différence entre les consonnances et les dissonnances.

Il s'ensuit, par conséquent, qu'on peut, avec deux sons simples, former des intervalles voisins de la tierce et aussi harmonieux qu'elle, pourvu qu'ils ne soient pas trop rapprochés de la seconde d'une part, et de la quarte d'autre part ; mes expériences sur les tuyaux bouchés de l'orgue me permettent d'avancer, en dépit des dogmes musicaux, que cette déduction est parfaitement d'accord avec la réalité, pourvu qu'on fasse l'expérience avec des sons réellement simples. Il en est de même des intervalles voisins de la sixte majeure, qui ne présentent avec elle aucune différence, au point de vue de la douceur de l'harmonie, tant qu'ils restent assez loin de la quinte et de l'octave. Aussi, tandis qu'il n'est pas difficile de produire des tierces majeures ou mineures justes sur l'harmonium, sur les tuyaux à anche, ou sur le violon, en émettant ensemble les deux sons, et cherchant à faire disparaître les battements, il est absolument impossible d'arriver au même résultat sans le secours d'autres intervalles, pour des tuyaux bouchés et pour des diapasons. On montrera plus tard comment on peut obtenir avec précision la justesse dans des intervalles de ce genre, dès qu'on émet plus de deux sons à la fois.

Entre les sons abondamment pourvus en harmoniques intenses, comme, par exemple, ceux des tuyaux à anche et du violon, et les sons absolument simples des diapasons et des tuyaux bouchés, se trouvent les sons dans lesquels les harmoniques graves sont seuls encore perceptibles ; c'est ce qui arrive pour les grands tuyaux ouverts de l'orgue, et pour la voix humaine émettant des voyelles sombres. Ici les harmoniques seuls ne suffisent pas à délimiter tous les intervalles consonnants, mais ce résultat est obtenu avec le secours des premiers différentiels.

A. *Sons complexes qui, outre le son fondamental, font encore entendre l'octave comme harmonique;* la quinte et la quarte ne sont plus délimités par les battements des harmoniques, mais par ceux des premiers différentiels.

a. *Quinte.* Soient 200 et 301 les nombres des sons fondamentaux ; les harmoniques seront 400 et 602, trop éloignés soit entre eux, soit des sons fondamentaux pour produire aucun battement. Mais les sons différentiels

301 — 200 =	101
400 — 301 =	99
Différence....	2

donnent deux battements. Et même ce nombre est précisément égal à celui que donneraient les deux harmoniques suivants. En effet,

$$2.301 - 3.200 = 2.$$

b. *Quarte.* Soient 300 et 401 les nombres ; les harmoniques seront 600 et 802. Point de battements encore ici. Mais les premiers différentiels :

600 — 401	=	199
802 — 600	=	202
Différence....		3

donnent 3 battements.

Pour les tierces, les sons résultants du second ordre devraient entrer en jeu.

B. *Sons qui, outre le son fondamental, font entendre la douzième.* Par exemple les petits tuyaux bouchés de l'orgue (le quintaton). Les choses se passent exactement de même que dans le cas précédent.

a. *Quinte.* Sons fondamentaux 200 et 301, harmoniques 600 et 903. Premier différentiel :

903 — 600...............	=	303
Quinte.................	=	301
Nombre de battements....	=	2

b. *Quarte.* Sons fondamentaux 300 et 401, harmoniques 900 et 1203. Premier différentiel :

1203 — 900..............	=	303
Son fondamental.........	—	300
Nombre de battements....	=	3

Encore ici les battements des tierces ne peuvent être produits que par les faibles différentiels du deuxième ordre.

C. *Sons qui, indépendamment du son fondamental, font entendre l'octave et la douzième.* Par exemple les grands tuyaux ouverts (en bois), le registre principal de l'orgue. Ici les quintes sont délimitées par les battements des harmoniques ; mais il n'est pas encore de même pour les quartes. Ce sont encore les premiers différentiels qui servent à délimiter les deux tierces.

a. *Tierce majeure.* Sons fondamentaux 400 et 501, octaves 800 et 1002, douzièmes 1200 et 1503. Premiers différentiels.

1002 — 800..............	=	202
1200 — 1002.............	=	198
Nombre de battements....	—	4

b. *Tierce mineure.* Sons fondamentaux 500 et 601, octaves 1000 et 1202, douzièmes 1500 et 1803. Différentiels :

1500 — 1202.............	=	298
1803 — 1500.............	=	303
Nombre de battements....	=	5

c. *Sixte majeure.* Sons fondamentaux 300 et 501, octaves 600 et 1002, douzièmes 900 et 1503. Différentiels :

600 — 501...............	=	99
1002 — 900..............	=	102
Nombre de battements....	=	3

Par le fait, avec les tuyaux ouverts de l'orgue on peut facilement entendre, non-seulement les battements des quintes et quartes fausses, mais aussi ceux des tierces majeures et mineures fausses; et on peut immédiatement les utiliser pour accorder ces tuyaux.

Donc, là où les harmoniques ne suffisent pas, en raison de la nature des sons considérés, les sons résultants viennent concourir à accuser, par des battements et par une certaine dureté, toute altération de la justesse des intervalles consonnants, l'octave, la quinte, la quarte, la sixte majeure, la tierce majeure et mineure, et à opérer la distinction entre eux et les intervalles voisins. Ce n'est que pour les sons absolument simples, que nous font défaut jusqu'ici les moyens de détermination de la tierce, et même, les battements qui altèrent l'harmonie dans la quinte et la quarte fausses, sont relativement trop faibles pour agir sur l'oreille d'une manière appréciable, parce qu'ils proviennent de sons résultant d'ordre supérieur. J'ai déjà dit qu'en réalité, deux tuyaux bouchés dont l'intervalle est intermédiaire entre la tierce majeure et la tierce mineure, donnent des consonnances tout aussi bonnes, que si l'intervalle était exactement d'une tierce majeure ou d'une tierce mineure. Je ne veux pas dire par là qu'une oreille musicale exercée ne reconnaîtra pas un intervalle de ce genre comme étrange et inusité, ce qu'on expliquera peut-être en disant qu'il est faux; mais l'impression immédiatement produite sur l'oreille, l'effet agréable pour les sens, abstraction faite de toute habitude musicale, ne sont pas plus mauvais que pour les intervalles justes.

Mais les choses se passent tout autrement quand on émet simultanément plus de deux sons. Nous avons vu qu'avec deux sons simples, les octaves sont délimitées d'une manière précise par les battements du premier différentiel avec le son fondamental. Supposons maintenant

d'abord une octave juste et plaçons entre les deux sons un troisième comme quinte ; nous obtiendrons des battements provenant des premiers différentiels, tant que la quinte ne sera pas juste.

Soient les sons 200 et 400 qui forment une octave juste et 301, la quinte fausse. Différentiels :

400 — 301...............	=	99
301 — 200...............	=	101
Nombre de battements....	=	2

Ces battements de la quinte située entre deux sons à l'octave sont beaucoup plus nets que ceux de la quinte seule. Dans ce dernier cas ils proviennent des faibles différentiels du deuxième ordre ; ici, au contraire, ils sont dus aux différentiels du premier ordre. Aussi, pour accorder les diapasons, Scheibler a-t-il prescrit d'en accorder d'abord deux exactement à l'octave, et de les faire résonner ensemble avec la quinte, pour accorder cette dernière. La quinte et l'octave, une fois justes, donnent la quarte juste.

Il en est tout à fait de même quand, deux sons simples étant exactement à la quinte, on veut intercaler un troisième son comme tierce majeure. Soient 400 et 600 les sons d'une quinte juste ; en intercalant la tierce majeure fausse 501 au lieu de 500 on a les différentiels suivants :

600 — 501...............	=	99
500 — 400...............	=	101
Nombre de battements....	=	2

La sixte majeure se trouve déterminée par sa réunion avec la quarte. Soient 300 et 400 une quarte juste, 501 une sixte fausse, nous avons les différentiels :

501 — 400...............	=	101
400 — 300...............	=	100
Nombre de battements....	=	1

Si nous voulons intercaler encore un son entre deux autres 300 et 400, formant une quarte juste, nous ne pouvons avoir que la tierce diminuée 350. En prenant 351, on obtient les différentiels :

400 — 351...............	=	49
351 — 300...............	=	51
Nombre de battements....	=	2

Mais les intervalles 8 : 7 et 7 : 6 sont en général déjà trop resserrés, pour donner des consonnances ; aussi ne peuvent-ils figurer que dans des accords faiblement dissonnants (les accords de septième).

Pour résumer les résultats de nos recherches sur les battements, elles ont montré que deux ou plusieurs sons, émis dans le voisinage les uns des autres, exercent toujours les uns sur les autres une influence perturbatrice, à moins que les intervalles qu'ils forment ne présentent certaines valeurs parfaitement déterminées. Il y a *consonnance*, quand plusieurs sons simultanément émis n'exercent pas l'une sur l'autre cette action perturbatrice. Dès que les rapports numériques des consonnances ne sont pas exactement observés, il se produit des battements, c'est-à-dire que les sons complexes eux-mêmes, ou leurs harmoniques, ou leurs sons résultants, se renforcent et s'affaiblissent alternativement les uns les autres. Ces différents sons, au lieu de coexister intégralement dans l'oreille, s'y nuisent réciproquement. Nous appelons ce phénomène *dissonnance*.

La cause la plus générale de la production des battements est fournie par les sons résultants ; ils en sont même la cause unique dans le cas de sons simples distants l'un de l'autre d'une tierce mineure au moins. Dans le cas de deux sons, ces battements suffisent parfaitement à délimiter d'une manière rigoureuse la quinte et même la quarte, mais non les tierces et les sixtes. Cependant ces derniers intervalles présentent des limites bien définies, lorsqu'ils se trouvent réunis, la tierce majeure à la quinte dans l'accord parfait majeur, et la sixte à la quarte dans l'accord de sixte et quarte.

Les tierces elles-mêmes cependant, même dans le cas de deux sons, sont séparées par des battements nettement appréciables, des intervalles voisins faux, dès que les premiers harmoniques accompagnent les sons fondamentaux. L'intensité et l'effet désagréable des battements des intervalles faux, croissent avec le nombre et l'intensité des harmoniques des sons fondamentaux. Il en est de même, par conséquent, de la facilité de distinguer les consonnances des dissonnances et des consonnances fausses, dont les différences respectives deviennent plus nettement tranchées, ce qui est d'une grande importance, aussi bien pour la sûreté avec laquelle l'oreille reconnaît les intervalles justes comme tels, que pour l'action énergique d'une suite d'accords, au point de vue de l'art.

Enfin si les harmoniques supérieurs sont relativement trop énergiques (dans les timbres mordants et criards), un seul son pourra déjà produire une sensation sonore intermittente au moyen des dissonnances de ses harmoniques aigus ; toute réunion de deux ou plusieurs sons de cette nature augmente d'une manière notable cette impression

désagréable et, en même temps, en raison de la grande quantité d'harmoniques et de sons résultants, il devient difficile à l'oreille de suivre un ensemble si compliqué.

Ces phénomènes sont d'une grande importance pour l'emploi des divers instruments dans les divers genres de compositions musicales. Les considérations qui doivent guider dans le choix de l'instrument approprié à tout un morceau, ou à une phrase musicale isolée dans les morceaux d'orchestre, sont de nature très-diverse. Avant tout, il faut tenir compte du degré de rapidité et d'énergie dont sont susceptibles les divers instruments; cela va de soi-même et nous n'avons pas besoin d'y insister. Sous le rapport de la rapidité, les instruments à archet et le piano, puis les flûtes et les hautbois surpassent tous les autres. A l'opposé, se trouvent les trompettes et les trombones qui se meuvent lourdement et difficilement, mais qui, en revanche, surpassent en force tous les autres instruments. Une autre considération essentielle réside dans la puissance d'expression, qui dépend principalement de la rapidité et de la sûreté avec lesquelles le musicien peut, à son gré, augmenter ou diminuer l'intensité du son. Sous ce rapport, les instruments à archet et, avec eux, la voix humaine sont supérieurs à tous les autres. Les instruments à anche, en bois et en cuivre, ne peuvent rester au-dessous d'une certaine intensité sans que l'anche cesse de vibrer. Les flûtes et les tuyaux d'orgue ne peuvent généralement modifier beaucoup l'intensité, sans changer en même temps la hauteur. Sur le piano, l'artiste peut modifier à son gré l'intensité au moment de l'attaque, mais non pendant la durée du son; aussi, sur cet instrument, dispose-t-on d'une grande variété dans l'accent rhythmique, mais l'expression mélodique proprement dite fait défaut. Toutes ces considérations ont leur importance dans l'emploi des instruments; leur exactitude est d'une observation facile, et elles sont connues et appliquées depuis longtemps. Il était plus difficile de caractériser l'influence des différents timbres; cependant nos recherches sur l'émission simultanée des sons permettent de rendre compte au moins des principales différences, dans l'action des accords pris sur les divers instruments, et d'indiquer de quelle manière on peut résoudre les problèmes qui se présentent, bien que, dans le détail, il reste un vaste champ inexploré pour des travaux plus approfondis.

Commençons par les sons simples *des grands tuyaux bouchés de l'orgue*. Par eux-mêmes, ils sont très-doux, très-agréables, sourds dans le bas, mais tout à fait harmonieux dans le haut. Ils sont cependant tout à fait impropres à la musique harmonique, au moins pour notre sentiment musical moderne. Nous avons prouvé que, pour des sons de cette nature, les intervalles de seconde donnaient seuls une disson-

nance caractérisée par des battements énergiques. Les octaves fausses et les intervalles dissonnants voisins de l'octave, la septième et la neuvième, donnent des battements provenant des premiers différentiels, qui sont déjà relativement faibles en comparaison de ceux provenant des harmoniques. Les battements des quintes et des quartes fausses sont à peine sensibles, même dans les circonstances les plus favorables. Aussi, en général, l'impression produite par les intervalles dissonnants, à l'exception de la seconde, se distingue-t-elle fort peu de celle déterminée par les consonnances; il s'ensuit que l'harmonie perd tout son caractère, et que l'auditeur perd le sentiment net de la distinction des intervalles. Quand on joue sur le registre bouché de l'orgue des compositions à plusieurs parties, présentant les dissonnances les plus mordantes et les plus énergiques, tout résonne avec la même douceur et la même harmonie, mais aussi c'est vague, ennuyeux, mou, sans caractère et sans énergie. Je prie le lecteur de s'en assurer s'il en trouve l'occasion. Rien ne montre toute l'importance du rôle que jouent les harmoniques dans la musique, mieux que cette impression produite par la musique formée de sons simples. Aussi l'emploi du grand registre bouché se restreint-il à des phrases musicales isolées, d'un caractère très-doux, par opposition aux registres mordants. Les instruments dont le timbre se rapproche le plus de celui des grands tuyaux bouchés sont les *flûtes* et le *jeu de flûtes* de l'orgue (tuyaux ouverts où l'air arrive sans force). On y entend déjà nettement l'octave à côté du son fondamental, et même la douzième si on souffle fort. Dans ce cas, les octaves et les quintes sont déjà nettement définies par les harmoniques, mais les tierces et les sixtes sont encore faiblement délimitées par les sons résultants. Aussi le caractère musical en est-il très-semblable à celui des tuyaux bouchés, ce qu'exprime très-bien le proverbe connu, d'après lequel rien n'est effrayant pour une oreille musicale comme un solo de flûte, si ce n'est un duo de flûtes. En revanche, associée à d'autres instruments qui font ressortir l'enchaînement de l'harmonie, la flûte, par la parfaite douceur de ses sons et la facilité à prendre les mouvements rapides, est extraordinairement agréable, charmante, et ne peut être remplacée par aucun autre instrument. Dans la musique antique, la flûte a joué un rôle beaucoup plus important que dans la musique moderne, ce qui doit être attribué à l'ensemble du caractère de l'idéal classique. En général, l'art classique éloigne de ses créations tout ce qui agit directement sur les sens d'une manière désagréable, et se borne au culte de la beauté pure; l'art moderne, au contraire, demande des moyens d'expression plus nombreux, et, par suite, admet, jusqu'à un certain degré, dans son sein, des effets contraires en eux-mêmes au bien-être des sens.

Au reste, même dans l'antiquité, les amateurs sérieux se prononçaient pour le son plus mordant des instruments à corde, et contre les sons doux de la flûte.

Les exigences harmoniques d'une musique polyphone compliquée, sont convenablement satisfaites par le jeu des tuyaux ouverts de l'orgue, appelé, pour cette raison, *registre principal*. Les harmoniques graves y sont nettement perceptibles jusqu'au deuxième pour les grands tuyaux, et jusqu'au cinquième pour les petits (violon principal). Les grands tuyaux produisent un son plus intense que les petits; pour leur donner plus de mordant, on associe très-souvent le registre de 8 pieds, qui fait la partie principale, avec celui de 4 pieds qui donne les mêmes notes à l'octave; ou bien encore, on réunit le registre principal au violon principal, de manière à obtenir par le premier la force, et par le second le mordant. On obtient ainsi des timbres qui contiennent les harmoniques jusqu'au sixième, présentant une intensité décroissant avec la hauteur; on apprécie alors d'une manière certaine la pureté des intervalles consonnants; les consonnances et les dissonnances se distinguent nettement les unes des autres, et cependant les faibles et mauvaises dissonnances des harmoniques aigus, dans les consonnances imparfaites, ne sont pas trop sensibles, et les sons secondaires ne peuvent, par leur nombre et leur intensité, tromper l'auditeur sur la marche des parties. Sous ce rapport, l'orgue présente un avantage qu'on ne rencontre pas au même degré sur les autres instruments; l'exécutant peut, à son gré, mélanger et modifier les timbres de la façon la plus appropriée au caractère du morceau.

Les petits tuyaux bouchés (quintaton), où le son fondamental est accompagné de la douzième, les jeux de flûte où viennent s'ajouter les deuxième et quatrième harmoniques, les tuyaux ouverts coniques, comme le registre du Gemshorn, où certains harmoniques élevés sont plus forts que les harmoniques graves, ne servent qu'à donner certains timbres caractéristiques à des phrases isolées, qui se distinguent ainsi de l'ensemble. Ils sont peu propres à former l'ensemble général de l'harmonie.

Enfin, on obtient des timbres tout à fait mordants avec les tuyaux à anche et les jeux de fourniture de l'orgue. Ces derniers, comme on l'a déjà expliqué, sont des reproductions artificielles de la constitution naturelle des sons complexes; chaque touche fait résonner en même temps une série de tuyaux, qui correspondent aux sons partiels (du 3e au 6e) de la note considérée. Ils ne sont applicables qu'à l'accompagnement du chant des masses ; employés isolément, ils font un fracas insupportable, et produisent une intolérable confusion de sons. Quand, au contraire, le chant de la foule fait entendre, avec une in-

tensité prépondérante, le son fondamental dans les notes de la mélodie, un rapport convenable s'établit entre les timbres, et il se produit une masse sonore puissante et bien proportionnée. Sans le secours des fournitures, on ne pourrait pas dominer une masse sonore aussi considérable, produite par des voix non exercées.

Sous le rapport harmonique, les voix humaines sont, en somme, assez semblables aux timbres de l'orgue. Dans les voyelles claires, il se produit à la vérité des harmoniques aigus isolés, mais ils sont trop disséminés pour exercer une influence essentielle et pénétrante sur le son des accords. Ce dernier subit toujours plutôt l'action des harmoniques graves, qui se produisent assez régulièrement dans toutes les voyelles. Néanmoins, pour les consonnances isolées, les sons caractéristiques des voyelles peuvent jouer un certain rôle. Si, par exemple, deux voix humaines chantent ensemble la tierce $si\flat_1$ — $ré_2$ sur la voyelle A, le quatrième son partiel du $si\flat_1$, c'est-à-dire $si\flat_3$, et le troisième du $ré_2$, c'est-à-dire la_3, viendront précisément se rencontrer sur les forts harmoniques caractéristiques de l'A, et l'imperfection de la consonnance de tierce sera mise au jour dans la dissonnance la_3, $si\flat_3$, tandis que cette dissonnance ne se produirait point en choisissant la voyelle O. D'autre part, la quarte $si\flat_1$ — $mi\flat_2$, chantée sur la voyelle A, sonnera purement, parce qu'alors la seconde note $mi\flat_2$ donne comme harmonique le même $si\flat_3$. En revanche, dans cette quarte, les harmoniques fa_3 et $mi\flat_3$, ou $ré_4$ et $mi\flat_4$ pourront apporter un trouble si on change l'A en AO ou en *AI*. Il s'ensuit, entre autres conséquences, qu'il n'est pas indifférent, au point de vue de l'effet musical, de chanter un morceau dans une langue ou dans une autre.

Abstraction faite de ces renforcements que peut produire la résonnance caractéristique de chaque voyelle sur des harmoniques isolés, les sons de la voix humaine sont accompagnés d'harmoniques graves relativement forts; aussi se prêtent-ils très-bien, comme ceux du registre principal de l'orgue, à l'enchaînement des accords. Mais les voix humaines présentent, en outre, un grand avantage sur l'orgue et les autres instruments pour l'exécution de la musique polyphone, c'est que les voix chantent sur des paroles. Les notes de chaque partie se trouvent ainsi reliées les unes aux autres, et les paroles forment, pour l'auditeur, une sorte de fil conducteur qui lui permet de reconnaître et de suivre, facilement et sûrement, les éléments de la masse sonore. Aussi la musique polyphone et le système tout entier de l'harmonie moderne se sont-ils développés en premier lieu par la voix humaine; par le fait, il n'y a rien de plus agréable à l'oreille que des phrases à plusieurs parties, bien harmonisées et chantées avec pureté et justesse par des voix exercées. Cependant, pour la pleine satisfaction de l'o-

reille, des morceaux de ce genre demandent impérieusement à être chantés selon les intervalles justes, et, malheureusement, nos chanteurs d'aujourd'hui arrivent rarement à ce résultat, parce qu'ils sont habitués, dès le début, à chanter avec accompagnement d'instruments accordés selon le tempérament, et donnant, par conséquent, des consonnances inexactes. Il n'y a que les chanteurs doués d'un sentiment musical sûr, qui trouvent d'eux-mêmes, sous ce rapport, la véritable justesse, qu'on ne leur apprend plus dans les écoles.

On trouve plus d'harmoniques, et partant plus de mordant que dans la voix humaine et dans le registre principal de l'orgue, dans les instruments à archet, si importants dans la musique. Par leur extrême rapidité et leur puissance d'expression, ils jouent dans la musique instrumentale le principal rôle, et, en raison du mordant de leur timbre, ils occupent une position à peu près intermédiaire entre les flûtes au son doux et les instruments de cuivre au son éclatant. Parmi les instruments de cette classe on trouve même une petite différence, en ce que l'alto et la contre-basse ont un timbre un peu plus mordant et plus sec, c'est-à-dire présentent des harmoniques relativement plus forts que le violon et le violoncelle. Les harmoniques perceptibles vont jusqu'au sixième et au huitième, selon que l'archet s'approche davantage de la touche de l'instrument dans le *piano*, et du chevalet dans le *forte;* leur intensité diminue régulièrement à mesure que grandit leur numéro d'ordre. Aussi est-ce sur les instruments à archet que la distinction entre la consonnance et la dissonnance est le plus nettement tranchée; le sentiment de la justesse des intervalles présente une grande sûreté, et il est bien connu que les violonistes et violoncellistes exercés ont une très-grande finesse d'oreille pour apprécier la hauteur du son. Mais, d'autre part, le timbre est si mordant que les mélodies douces, chantantes, ne vont plus bien sur les instruments à archet, et, à l'orchestre, sont plutôt réservées aux flûtes et aux clarinettes. En outre, les accords complets deviennent relativement trop durs, parce que, dans chaque intervalle, les harmoniques des deux sons qui se trouvent en rapport de dissonnance, sont assez sensibles, notamment dans les tierces et les sixtes. Il faut ajouter à cela, que les tierces et les sixtes imparfaites de la gamme usuelle se distinguent déjà très-nettement du son des tierces et des sixtes justes sur les instruments à archet; nous reviendrons là-dessus dans la question du tempérament. Aussi, d'ordinaire, les accords prolongés sont-ils rares, et ne sont-ils employés qu'exceptionnellement sur les instruments à archet, parce qu'ils n'y sont pas assez harmonieux; par contre, on y prodigue les mouvements et les dessins rapides, les accords en arpéges, pour lesquels ces instruments sont extraordi-

nairement appropriés, et où l'aigreur du timbre général n'est pas aussi sensible.

Les battements se produisent d'une façon particulière sur les instruments à archet; au moins il est rare d'y entendre des battements réguliers, lents et faciles à compter. Il faut en chercher la cause dans ces petites irrégularités de l'action de l'archet sur la corde, dont on a déjà parlé plus haut, et qui produisent sur l'oreille l'effet d'un raclement. En observant la forme de la vibration, on voit qu'à chaque secousse très-petite imprimée par le raclement de l'archet, les courbes de vibrations se déplacent subitement en avant ou en arrière d'une certaine quantité, ou, selon l'expression scientifique, changent brusquement de phase. Comme c'est de la différence de phase que dépendent les renforcements ou affaiblissements réciproques de deux sons simultanés, chaque petit arrêt ou raclement de l'archet trouble la marche des battements; et si on émet deux sons de même hauteur, chaque changement brusque de la phase produit une modification de l'intensité, du même genre que celle que donneraient des battements irréguliers et saccadés. Aussi est-ce le propre des meilleurs instruments et des meilleurs instrumentistes de produire des battements lents, une sonorité régulière dans la tenue des accords consonnants. A mon avis, c'est là peut-être une des causes qui font que dans un quatuor d'instruments à cordes joué par des artistes capables d'exécuter individuellement des solos d'une manière très-agréable, il se produit souvent une dureté si forte et si aigre, qu'elle est tout à fait hors de proportion avec la très-faible dureté produite par chacun des artistes sur son instrument. Dans mes observations sur la forme des vibrations, j'ai trouvé qu'il était difficile d'empêcher une ou deux variations brusques de se produire en une seconde. Si dans un solo, le son de la corde est interrompu à petits intervalles presque imperceptibles, ce qui échappe presque à l'auditeur; pour un quatuor, au contraire, si on donne un accord dont les notes ont un harmonique commun, on entend, dans le son général, de quatre à huit variations brusques et irrégulières de l'intensité, qui ne peuvent passer inaperçues. Aussi pour avoir un bon ensemble, faut-il une beaucoup plus grande pureté de son que dans un solo.

Parmi les instruments à cordes ébranlées par voie de percussion, le piano occupe la première place. De l'analyse faite plus haut, on déduit que les octaves graves du piano sont riches en harmoniques, et les octaves aiguës relativement pauvres. Dans les octaves graves, le second et le troisième sons partiels sont souvent aussi forts que le son fondamental, le second est même quelquefois plus fort. Il s'ensuit que les dissonnances voisines de l'octave, les septièmes et les neuvièmes,

sont aussi mordantes que les secondes, et que les douzièmes et les quintes diminuées ou augmentées sont assez dures. En revanche les quatrième, cinquième et sixième sons partiels qui servent à délimiter les tierces, diminuent très-rapidement d'intensité; en sorte que les tierces sont délimitées d'une manière relativement beaucoup moins nette que les octaves, les quintes et les quartes. Ce dernier point est important parce que c'est par là que, sur le piano, les tierces fausses du tempérament sont beaucoup plus supportables que sur les autres instruments à timbre mordant, tandis que les octaves, les quintes et les quartes sont cependant délimités d'une façon nette et précise. Malgré l'abondance relative des harmoniques, les dissonnances ne produisent pas sur le piano une impression à beaucoup près aussi énergique que sur les instruments à notes tenues, parce que le son du piano ne présente une grande intensité qu'au moment de l'attaque, et s'éteint très-rapidement, en sorte que les dissonnances n'ont pas le temps de donner les battements caractéristiques, pendant que le son, à l'instant de l'émission, est dans toute sa force; ils ne peuvent se produire qu'au moment où l'intensité du son diminue déjà. C'est ce qui fait que, dans la musique de piano moderne, depuis surtout que Beethoven a appris à tenir compte des propriétés caractéristiques de l'instrument, on trouve un redoublement et une accumulation d'intervalles dissonnants qui seraient tout à fait intolérables sur d'autres instruments. On peut facilement apprécier ce fait, en essayant de jouer des morceaux modernes de piano sur l'harmonium ou l'orgue.

Les facteurs d'instruments, guidés seulement par une oreille exercée, et non par une théorie quelconque, ont trouvé avantageux de choisir la place où frappe le marteau, de manière à faire entièrement disparaître le septième son partiel, et à conserver le sixième, mais avec une faible intensité; cela tient évidemment à la construction de notre système musical. Les cinquième et sixième sons partiels servent à délimiter la tierce mineure, et c'est de cette manière, par la coïncidence des harmoniques, que sont déterminés sur le piano presque tous les intervalles considérés comme consonnances, l'octave, la quinte, la quarte par des harmoniques relativement forts, la tierce et la sixte majeures par des harmoniques faibles, et la tierce mineure par les plus faibles de tous. Si le septième son partiel venait à entrer aussi en jeu, la septième diminuée 4 : 7 nuirait à l'harmonie de la sixte majeure, la quinte diminuée 5 : 7 à celle de la quinte et de la quarte, la tierce diminuée 6 : 7 à celle de la tierce mineure, sans qu'il en résultât une détermination plus précise pour de nouveaux intervalles musicaux d'un usage possible.

Nous avons déjà mentionné une propriété plus importante du tim-

bre choisi, en vertu de laquelle les sons élevés du piano contiennent beaucoup moins d'harmoniques et de plus faibles que les sons graves. Elle apparaît beaucoup plus nettement sur cet instrument que dans les autres, et il est facile d'en donner la raison au point de vue musical. En règle générale, les notes aiguës sont données en même temps que des notes graves, et leur relation avec ces dernières est facilement déterminée d'une manière suffisante par les harmoniques élevés des notes graves. Si les notes de la basse et du haut forment entre elles un intervalle de deux ou trois octaves, la seconde octave, la tierce et la quinte supérieures de la note grave se trouvent très-voisines de la note d'en haut, et forment directement avec elle une consonnance ou une dissonnance, sans avoir besoin de faire entrer en jeu les harmoniques de la note d'en haut. L'addition des harmoniques aux notes les plus élevées du piano ne pourrait donc leur donner qu'un timbre aigre, sans ajouter quelque chose à leur caractérisation; sur les bons instruments, le marteau est, en réalité, disposé de manière que les notes des octaves supérieures soient accompagnées seulement de leur premier harmonique, et encore assez faible. Elles résonnent alors d'une manière douce et agréable, comme des sons de flûte. D'autres facteurs, cependant, aiment mieux rendre ces notes aiguës éclatantes et pénétrantes comme les sons de la petite flûte, en plaçant le point d'attaque de la corde à son extrémité, ce qui renforce les harmoniques. Mais, ce procédé fait jurer le timbre de ces cordes avec le caractère des autres sons, et lui fait perdre de son charme.

Dans beaucoup d'autres instruments, dont la construction ne permet pas de modifier le timbre aussi librement que sur le piano, on a su obtenir, par d'autres moyens, une modification analogue du timbre suivant la hauteur. Dans les instruments à archet, c'est au moyen de la résonnance de la caisse, dont le son propre est situé dans l'octave la plus grave de l'instrument. Comme les sons partiels des cordes résonnantes sont d'autant plus forts dans l'air qu'ils se rapprochent davantage des sons partiels de la caisse, les harmoniques de cette dernière renforceront, bien plus dans le haut que dans le bas, les sons fondamentaux de l'instrument. Pour les notes les plus graves du violon, au contraire, ce n'est pas seulement le son fondamental, mais aussi son octave et sa douzième qui sont favorisés par la résonnance, parce que le son propre grave de la caisse, occupant une position intermédiaire entre le son fondamental et son premier harmonique, le son propre aigu se trouve entre le premier et le second harmonique. Il y a quelque chose d'analogue à cela dans les jeux de fourniture sur l'orgue, où les séries d'harmoniques, fournies par des tuyaux distincts, sont moins considérables pour les notes aiguës que pour les notes

graves du registre. Tandis que, dans les octaves graves, chaque touche ouvre six tuyaux correspondant aux six sons partiels, dans les deux dernières octaves, on n'ajoute au son fondamental que l'octave et la douzième, ou même l'octave seule.

On trouve aussi quelque chose d'analogue dans la voix humaine, quoique le phénomène varie beaucoup, suivant les différentes voyelles. Mais si on compare des notes aiguës et graves, chantées sur la même voyelle, on trouve que la résonnance de la cavité de la bouche renforce ordinairement les harmoniques supérieurs des notes graves de la basse, tandis que, dans le soprano, que la note chantée soit voisine ou éloignée de la hauteur caractéristique de la voyelle, tous les harmoniques sont beaucoup plus faibles. Aussi, en général, au moins pour les voyelles ouvertes, les harmoniques perceptibles sont-ils beaucoup plus nombreux dans la voix de basse que dans la voix de soprano.

Il nous reste encore les instruments à anche, c'est-à-dire les instruments à vent, de bois et de cuivre. La clarinette, parmi les premiers, le cor parmi les seconds, se distinguent par la douceur de leur timbre, tandis que le basson et le hautbois, d'une part, le trombone et la trompette d'autre part, présentent les timbres les plus mordants usités en musique.

Bien que les cornets à piston, employés dans ce qu'on appelle la musique d'harmonie, aient un son beaucoup moins criard que les trompettes proprement dites, à tuyau invariable non interrompu, le nombre et la puissance de leurs harmoniques sont encore trop considérables pour produire un bon effet, surtout dans les consonnances imparfaites, et les accords y sont très-bruyants, très-durs et très-aigres; aussi ces instruments ne sont-ils tolérables qu'employés en plein air. Dans la musique d'orchestre, on se borne à employer, dans un petit nombre de consonnances aussi parfaites que possible, les trompettes et les trombones, qu'on ne peut pas abandonner à cause de leur énergie pénétrante.

La clarinette se distingue des autres instruments à vent de l'orchestre, en ce que les sons partiels pairs y font défaut, ce qui ne peut manquer de produire de nombreuses perturbations particulières dans l'action des accords. Quand deux clarinettes sonnent ensemble, tous les intervalles consonnants, à l'exception de la sixte majeure 3 : 5 et de la douzième 1 : 3, ne sont délimités que par des sons résultants. Cependant, il suffit, dans tous les cas, des différentiels du premier ordre, les plus forts de tous les sons résultants, pour produire les battements caractéristiques des consonnances fausses. Il s'ensuit qu'en général les consonnances de deux clarinettes présenteront peu de dureté, et devront être relativement harmonieuses; c'est ce qui arrive,

en effet, excepté pour la sixte mineure et la septième mineure trop voisines de la sixte majeure, et pour la onzième et la treizième mineure trop voisines de la douzième. D'autre part, si l'on emploie simultanément une clarinette avec un violon ou un hautbois, la plupart des consonnances sonneront différemment, suivant que la clarinette fera la note grave, ou la note aiguë de l'intervalle. Par exemple, la tierce majeure *ré*$_2$ — *fa*♯$_2$ sera meilleure si la clarinette fait le *ré*$_2$ et le hautbois le *fa*♯$_2$, de telle manière que le cinquième son partiel de la clarinette coïncide avec le quatrième du hautbois. Les groupes de sons partiels 3 : 4 et 5 : 6, perturbateurs de la tierce majeure, ne peuvent pas se produire, parce que le quatrième et le sixième sons manquent sur la clarinette. Si, au contraire, nous donnons le *ré*$_2$ sur le hautbois, il manque au *fa*♯$_2$ de la clarinette le quatrième son formant la coïncidence, mais, en revanche, il présente les troisième et cinquième sons producteurs de battements. Des causes analogues font que la quarte et la tierce mineure sont meilleures, au contraire, quand la clarinette fait la note haute. J'ai fait des expériences de ce genre avec la clarinette et un registre mordant de l'harmonium qui a des sons partiels pairs ; mais ce dernier instrument était accordé suivant la gamme naturelle, et non suivant le tempérament. Si je donnais sur la clarinette le *si*♭$_1$, en jouant sur l'harmonium le *mi*♭$_2$, le *ré*$_2$, le *ré*♭$_2$, la tierce majeure *si*♭$_1$ — *ré*$_2$ était meilleure que la quarte *si*♭ — *mi*♭, et beaucoup meilleure que la tierce mineure *si*$_1$ — *ré*$_2$. En donnant le même son sur la clarinette et l'harmonium, faisant un *fa*$_1$, un *sol*♭$_1$, un *sol*$_1$, la tierce majeure *sol*♭$_1$, *si*♭$_1$, était plus dure, non-seulement que la quarte *fa*$_1$, *si*♭$_1$, mais même que la tierce mineure *sol*$_1$, *si*♭$_1$.

Je mentionne ici cet exemple, où j'ai été guidé par des considérations purement théoriques, entièrement confirmées par l'expérience, parce qu'il montre bien que la série des consonnances, adaptées aux timbres usuels, change aussitôt que des modifications surviennent dans le timbre.

Tout ce qui précède doit suffire à prouver que, par la route que nous avons suivie, on peut trouver l'explication de nombreuses particularités résultant de la production des intervalles sur les divers instruments. Nous n'approfondirons pas davantage ce sujet, parce que, d'une part, il nous manque les travaux préliminaires suffisants, en particulier des recherches plus précises sur les modifications du timbre des notes isolées et que, d'autre part, une étude plus approfondie de cette question nous entraînerait trop loin de notre but principal, et présenterait un intérêt plutôt technique que général.

CHAPITRE XII

DES ACCORDS.

Nous avons étudié jusqu'ici l'action de deux sons simultanés formant des intervalles déterminés; il est assez facile, maintenant, de voir ce qui arrivera dans le cas de l'émission simultanée de plus de deux sons. Nous appelons *Accords* ces réunions de plusieurs sons. Nous allons, en premier lieu, rechercher le degré d'harmonie des accords, exactement dans le même sens que pour les intervalles de deux sons. Nous ne nous occupons, dans ce chapitre, que de l'action des accords considérés isolément, en dehors de tout enchaînement musical, sans avoir égard aux modes, aux gammes, aux modulations, etc. Il s'agit, en premier lieu, de déterminer *dans quelles conditions les accords sont consonnants*. Pour qu'un accord puisse être consonnant, il est clair que les sons qui s'y trouvent doivent être deux à deux consonnants; car si deux d'entre eux seulement forment une dissonnance et donnent des battements, l'harmonie de l'accord est détruite.

Nous trouvons les accords consonnants de trois sons, comme il est facile de s'en assurer, en superposant à un son fondamental que nous appellerons *ut*, deux autres sons formant avec lui un intervalle consonnant; il faut voir maintenant si le nouvel intervalle, formé par les deux sons superposés entre eux, est aussi consonnant. Dans ce cas, chacun des trois sons forme une consonnance avec les deux autres et l'accord est consonnant.

Bornons-nous d'abord aux intervalles moindres qu'une octave. Parmi les intervalles de ce genre, nous avons trouvé les consonnances suivantes :

1° La quinte *ut* — *sol* $\frac{2}{3}$;

2° La quarte *ut* — *fa* $\frac{4}{3}$;

3° La sixte majeure *ut* — *la* $\frac{5}{3}$;

4° La tierce majeure *ut* — *mi* $\frac{5}{4}$;

5° La tierce mineure *ut* — *mi*♭ $\frac{6}{5}$;

6° La sixte mineure *ut* — *la*♭ $\frac{8}{5}$;

7° Enfin, aussi la septième naturelle *ut* — *si*♭ (1) $\frac{7}{4}$, qui est aussi harmonieuse que la sixte mineure. Le tableau suivant donne un aperçu des accords d'une étendue moindre qu'une octave. L'accord doit être formé du son fondamental *ut*, combiné avec un son de la première ligne horizontale et un son de la première colonne verticale. Au point d'intersection des lignes verticales et horizontales correspondant aux sons choisis, se trouve donné l'intervalle qu'ils forment entre eux. Les noms des intervalles consonnants ont été imprimés avec un caractère différent, en sorte que l'œil verra tout de suite où trouver les accords consonnants.

ut = 1	*sol* $\frac{3}{2}$	*fa* $\frac{4}{3}$	*la* $\frac{5}{3}$	*mi* $\frac{5}{4}$	*mi*♭ $\frac{6}{5}$	*la*♭ $\frac{8}{5}$
sol $\frac{3}{2}$						
fa $\frac{4}{3}$	Seconde majeure. $\frac{9}{8}$					
la $\frac{5}{3}$	Seconde majeure. $\frac{10}{9}$	*Tierce majeure.* $\frac{5}{4}$				
mi $\frac{5}{4}$	*Tierce mineure.* $\frac{6}{5}$	Seconde mineure. $\frac{16}{15}$	*Quarte.* $\frac{4}{3}$			
mi♭ $\frac{6}{5}$	*Tierce majeure.* $\frac{5}{4}$	Seconde majeure. $\frac{10}{9}$	Quarte augmentée. $\frac{25}{18}$	Seconde mineure. $\frac{25}{24}$		
la♭ $\frac{8}{5}$	Seconde mineure. $\frac{16}{15}$	*Tierce mineure.* $\frac{6}{5}$	Seconde mineure. $\frac{25}{24}$	Quarte diminuée. $\frac{32}{25}$	*Quarte.* $\frac{4}{3}$	
si♭ $\frac{7}{4}$	Tierce diminuée. $\frac{7}{6}$	Fausse quarte. $\frac{21}{16}$	Seconde mineure. $\frac{21}{20}$	Quinte diminuée. $\frac{7}{5}$	Fausse quinte. $\frac{35}{24}$	Seconde majeure. $\frac{35}{32}$

Il résulte de ce tableau que les seuls accords consonnants de trois

(1) Le sixième harmonique ramené dans la première octave est un peu plus bas que le *si*♭ ordinaire.

sons compris dans une octave sont les suivants, au nombre de six :

1°	*ut*	*mi*	*sol*	....	2°	*ut*	*mi*♭	*sol*
3°	*ut*	*fa*	*la*	....	4°	*ut*	*fa*	*la*♭
5°	*ut*	*mi*♭	*la*♭	....	6°	*ut*	*mi*	*la.*

Dans les théories musicales, les deux premiers sont considérés comme les accords fondamentaux, dont on peut déduire tous les autres. Nous pouvons les considérer comme formés de deux tierces superposées, l'une majeure et l'autre mineure. L'accord *ut*, *mi*, *sol*, où la tierce majeure est en bas et la tierce mineure en haut, est un *accord majeur*, et même se distingue de tous les autres accords de ce genre, en ce que les sons qui le composent sont aussi resserrés que possible; aussi est-il considéré comme l'*accord fondamental*, ou *accord-type* de tous les accords majeurs. L'accord *ut*, *mi*♭, *sol*, au contraire, où la tierce mineure est en bas, est l'*accord-type* de tous les *accords mineurs.*

Les deux accords suivants, *ut*, *fa*, *la*, et *ut*, *fa*, *la*♭ sont appelés, d'après leur composition, *accords de sixte et quarte*. En prenant pour son grave non plus l'*ut*, mais le *sol*, ils se changent en

$$sol—_1,\ ut_0,\ mi^0 \quad \text{et} \quad sol_0—_1,\ ut_0,\ mi_0♭.$$

On peut donc supposer qu'ils proviennent des accords majeur et mineur *ut*, *mi*, *sol* et *ut*, *mi* ♭, *sol*, où la quinte *sol* a été baissée d'une octave.

Les deux derniers accords, *ut*, *mi*, *la* ♭, et *ut*, *mi*, *la* ♭, s'appellent des *accords de sixte et tierce*, ou simplement *accords de sixte.* En prenant pour note grave du premier, *mi* au lieu de *ut*, on a mi_0, sol_0, ut_0, et, en prenant pour note grave du second, *mi* ♭ au lieu de *ut*, on a $mi♭_0$, sol_0, ut_1. Ils peuvent donc être considérés commme les renversements d'un accord fondamental majeur ou mineur, où la note basse aurait été haussée d'une octave.

En admettant ces renversements, les six accords consonnants prennent la forme suivante :

ut,	*mi*,	*sol*		*ut*,	*mi*♭,	*sol*		
	mi,	*sol*,	ut_1		*mi*♭,	*sol*,	ut_1
		sol,	ut_1, mi_1			*sol*,	ut_1, $mi♭_1$.

Nous remarquerons, en premier lieu, que la septième naturelle *si*♭ —, quoique formant par elle-même, avec le son fondamental *ut*, un bon intervalle, tantôt meilleur, tantôt pire que la sixte mineure *ut*, *la* ♭, n'a pu entrer cependant dans aucun accord, parce qu'elle forme, avec

tous les autres intervalles consonnants, des consonnances pires qu'elle-même. Les meilleures combinaisons qu'elle puisse donner sont *ut*, *mi*, *si* ♭ —, et *ut*, *sol*, *si* ♭ —. Dans la première se trouve l'intervalle *mi*, *si* ♭ —, intermédiaire entre la quarte et la quinte ; dans la dernière figure, la tierce diminuée *sol*, *si* ♭ —. La sixte mineure, au contraire, donne, avec la tierce mineure, une quarte juste, et, avec la quarte, une tierce mineure ; en sorte que dans l'accord de sixte, ou de sixte et quarte, elle reste le plus mauvais intervalle de l'accord, qui peut, par suite, être encore considéré comme consonnant. C'est ce qui explique pourquoi la septième naturelle ne peut s'employer en harmonie, tandis que la sixte mineure, qui n'est guère meilleure par elle-même, y trouve sa place.

Un accord qui présente beaucoup d'intérêt pour la théorie musicale, et sur lequel nous reviendrons plus tard, est l'accord *ut*, *mi*, *la* ♭. Nous devons le ranger parmi les accords dissonnants, parce qu'il contient la quarte diminuée *mi*, *la* ♭, dont le rapport numérique est $\frac{32}{25}$. Cette quarte diminuée se rapproche tellement d'une tierce majeure *mi*, *sol* ♯ que, sur nos instruments à clavier, l'orgue et le piano, ces deux intervalles ne présentent aucune différence. On a

$$mi,\ la\flat = \frac{32}{25} = \frac{5}{4} \cdot \frac{128}{125},$$

ou, plus simplement,

$$mi,\ la\flat = (mi,\ sol\sharp) \cdot \frac{42}{43}.$$

Il en résulte que, sur le piano, cet accord, qu'au point de vue de l'exécution, on peut écrire indifféremment *ut*, *mi*, *la* ♭, ou *ut*, *mi*, *sol* ♯, devrait être consonnant, car chacun des sons qu'il renferme forme, avec les autres, un intervalle considéré sur le piano comme consonnant, cet accord est cependant une des dissonnances les plus dures ; tous les musiciens sont unanimes là-dessus, et on peut s'en assurer par soi-même quand on voudra. Sur un instrument accordé selon la gamme naturelle, on reconnaît l'intervalle *mi*, *la* ♭, comme nettement dissonnant. Cet accord est un bon exemple, qui montre que la signification originelle des intervalles se conserve et détermine le jugement de l'oreille, même sur la gamme fausse du piano.

Quant à la douceur des divers renversements des accords trouvés plus haut, elle dépend, en premier lieu, des consonnances parfaites ou imparfaites formées par les intervalles qu'ils renferment. Nous avons vu que la quarte sonne moins bien que la quinte, les

tierces et sixtes mineures moins bien que les mêmes intervalles majeurs ; or,

l'accord	*ut, mi, sol*	contient une	quinte, tierce majeure, tierce mineure,
—	*mi, sol,* ut_1	— —	quarte, tierce mineure, sixte mineure,
—	*sol,* ut_1, mi_1	— —	quarte, tierce majeure, sixte majeure ;

l'accord	*ut, mi♭, sol*	contient une	quinte, tierce mineure, tierce majeure,
—	*mi♭, sol,* ut_1	— —	quarte, tierce majeure, sixte majeure,
—	*sol,* ut_1, mi_1	— —	quarte, tierce mineure, sixte mineure.

Comme les altérations de l'harmonie des intervalles justes sont plus distinctes pour les tierces et les sixtes que pour les quartes, il s'ensuit que, dans le mode majeur, le renversement de sixte et quarte sonne mieux que l'accord fondamental, et celui-ci mieux que le renversement de sixte. Inversement, le renversement en sixte de l'accord mineur est meilleur que l'accord fondamental, qui lui-même est meilleur que le renversement de sixte et quarte. Cette conséquence se vérifie d'une manière tout à fait exacte dans les régions moyennes de la gamme, quand on accorde réellement les intervalles suivant la gamme naturelle. Mais, dans les expériences de ce genre, il faut comparer les accords, pris isolément, sans modulations. Dès qu'on enchaîne les modulations, comme, par exemple, dans les cadences finales, le sentiment de la tonalité, dans l'accord principal de laquelle on trouve le repos, vient gêner l'observation. Dans les régions graves de la gamme, toutes les tierces sont moins bonnes que les sixtes.

D'après la nature des intervalles, on devrait s'attendre à trouver l'accord mineur *ut*, *mi* ♭, *sol*, aussi bon que l'accord majeur *ut*, *mi*, *sol*, puisque tous deux contiennent une quinte, une tierce majeure et une tierce mineure. Ce n'est pas du tout ce qui arrive en réalité. L'accord mineur est sensiblement moins harmonieux que l'accord majeur, ce qui tient aux sons résultants que nous avons encore ici à prendre en considération. Nous avons déjà vu, dans l'étude des intervalles, que les sons résultants peuvent donner des battements dans l'émission simultanée de deux intervalles, quoique, pour chacun de ceux-ci, pris isolément, les battements soient nuls, ou du moins à peine sensibles.

Nous avons donc encore à étudier les sons résultants des accords majeur et mineur. Nous nous bornerons aux sons résultants du premier ordre, formés par les sons fondamentaux et leurs premiers harmoniques. Les sons partiels fondamentaux sont désignés par des blanches ; les sons résultant des sons fondamentaux les uns avec les autres par des noires ; ceux des sons fondamentaux avec leurs premiers har-

moniques, par des croches et des doubles croches. Un trait placé à côté d'une note indique qu'elle devrait être un peu plus grave que le son correspondant de la gamme.

1° Accords majeurs avec sons résultants :



2° Accords mineurs avec sons résultants :



Dans les accords majeurs, les sons résultants du premier ordre, et même les plus graves du deuxième ordre, ceux désignés par des croches, ne font que doubler les sons de l'accord à l'octave au-dessous. Les sons résultants les plus aigus du deuxième ordre, ceux désignés par des doubles croches, sont extraordinairement faibles, parce que, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité des sons résultants diminue quand l'intervalle des sons primaires augmente ; c'est aussi de là que dépend la position élevée des sons résultants dont il s'agit. J'ai toujours pu facilement entendre sur l'harmonium, à l'aide des résonnateurs, les sons résultants graves du deuxième ordre, ceux désignés par des croches ; mais jamais ceux désignés par des doubles croches. Je les ai donnés pour compléter la théorie ; il ne serait pas impossible qu'ils devinssent sensibles pour des sons très-forts, pourvus d'harmoniques intenses, mais pour les sons usuels, nous pouvons les négliger.

Dans les accords mineurs, au contraire, les sons résultants du premier ordre, facilement perceptibles, viennent déjà apporter des perturbations. Ils ne sont pas, il est vrai, assez près les uns des autres pour produire des battements, mais ils sont en dehors de l'harmonie. Dans l'accord fondamental et dans celui de sixte, ces sons résultants, désignés par des noires, forment un accord majeur de *la* ♭; dans l'accord de sixte et quarte, il entre même en jeu deux nouveaux sons, le *la* ♭

et le *si* ♭, étrangers à l'accord primitif. En revanche, les sons résultants du deuxième ordre, ceux désignés par des croches, sont assez voisins soit des sons de même ordre, soit des sons primaires de l'accord et des sons résultants du premier ordre, pour que des battements puissent prendre naissance ; dans les accords majeurs, au contraire, les sons de cette catégorie sont encore entièrement compris dans l'accord. Nous trouvons donc pour l'accord mineur fondamental de notre exemple *ut*, *mi* ♭, *sol*, les dissonnances *la* ♭, *si* ♭, ut_1, formées par les sons résultants. Elles sont les mêmes dans l'accord de sixte *mi* ♭, *sol*, ut_1. Dans l'accord de sixte et quarte, *sol*, *ut*, *mi* ♭, nous trouvons les dissonnances *si* ♭, ut_1, et *sol*, *la* ♭. Cette influence perturbatrice des sons résultants du deuxième ordre, sur l'accord mineur, est trop faible cependant pour lui donner le caractère des dissonnances ; mais elle augmente la dureté de l'accord comparé à l'accord majeur, d'une manière sensible sur un instrument juste, c'est-à-dire accordé d'après les intervalles mathématiques. Sur nos instruments tempérés ordinaires, cependant, cette dureté, produite par les sons résultants, se fait relativement peu sentir à côté de celle, beaucoup plus grande, produite par les consonnances inexactes. Dans la pratique, l'influence des sons résultants graves du premier ordre, les plus intenses, me paraît beaucoup plus importante ; ils n'augmentent pas, il est vrai, la dureté, mais ils introduisent des éléments étrangers à l'accord, qui, pour l'accord mineur d'*ut*, appartiennent aux accords majeurs de *la* ♭ et de *mi* ♭ (1). Aussi l'accord mineur présente-t-il quelque chose d'étrange, qui n'est pas assez prononcé pour détruire entièrement la sensation de la consonnance, mais qui suffit cependant pour donner, à l'harmonie et à la signification musicale de cet accord, quelque chose de voilé, de vague, dont l'auditeur ne sait pas démêler la cause, parce que les faibles sons résultants qui le produisent sont couverts par d'autres sons plus forts, et ne peuvent être distingués que par une oreille exercée. C'est ce qui fait que les accords mineurs sont si propres à exprimer des sentiments vagues, sombres ou austères. Dans son *Esthétique* (3e partie, § 772), Vischer a très-bien développé ce caractère du mode mineur, et montré qu'il s'adaptait, à la vérité, à des nuances multipliées de la joie ou de la douleur, mais que le caractère général des sentiments exprimés par le mode mineur consistait dans quelque chose de voilé et de vague.

(1) Je dois insister sur ce point : ce n'est pas du tout par l'effet d'une particularité de l'harmonium que les accords mineurs sont troublés par les sons résultants ; des sons émis simultanément par des voix de soprano ou des violons, surtout dans le haut et pour les petits intervalles, donnent naissance à des sons résultants assez forts pour produire l'effet dont il s'agit.

Toute tierce mineure, toute sixte, accompagnée du son résultant principal, se transforme déjà d'elle-même en un accord majeur. Pour la tierce mineure mi_1, sol_1, le son résultant ut_0 en fait un accord majeur, pour la sixte majeure sol_1, mi_2, c'est l'ut_1, pour la sixte mineure mi_1, ut_2, c'est le sol_0. Tous ces intervalles de deux sons donnent donc déjà naturellement des accords majeurs de trois sons, et, en ajoutant à l'un d'eux un troisième son non compris dans l'accord majeur formé, il se produit naturellement un conflit.

Les harmonistes modernes répugnent, la plupart du temps, à admettre que l'accord mineur soit moins consonnant que l'accord majeur. Ils ont fait leurs expériences exclusivement sur des instruments tempérés où cette distinction reste plutôt douteuse. En revanche, pour les intervalles naturels (1) et avec des timbres moyennement mordants, la différence est très-frappante et ne saurait être contestée. Chez les anciens compositeurs du moyen âge qui écrivaient presque exclusivement pour les voix, et qui, par suite, n'étaient point obligés d'altérer les consonnances, ce sentiment était très-nettement développé. A mon avis, c'est là qu'il faut rechercher la cause principale de la répugnance à employer l'accord mineur à la fin des phrases musicales. Au moyen âge, jusques et y compris Sébastien Bach, on ne se sert généralement que de l'accord majeur comme accord final, ou d'accord sans tierce; on trouve même encore quelquefois, dans Hændel et dans Mozart, un accord majeur terminant une phrase mineure. Mais ici, au degré plus grand de consonnance, viennent se joindre encore d'autres considérations, en particulier l'affirmation nette de la tonique, qui assurent à l'accord majeur un avantage décisif. La question sera traitée plus à fond dans le quinzième chapitre.

Après avoir déterminé et comparé les accords consonnants de trois sons qui ne dépassent pas l'étendue d'une octave, arrivons à ceux qui comprennent de plus grands intervalles. Nous avons trouvé déjà plus haut, qu'en élevant ou en abaissant à volonté d'une ou de deux octaves, l'un des sons d'un intervalle consonnant, la consonnance persiste, quoique le degré d'harmonie de l'intervalle soit un peu modifié dans ce renversement. Il s'ensuit que nous pouvons élever ou abaisser arbitrairement d'un nombre entier d'octaves, l'un quelconque des sons de chacun des accords consonnants précédemment trouvés. Si les trois intervalles de l'accord de trois sons étaient consonnants avant le renversement, ils le seront aussi après. Nous avons déjà vu que, de cette manière, on pouvait tirer les accords de sixte et de sixte et quarte

(1) Voir, plus bas, dans le 15e chapitre, plus de développements sur les différentes gammes et sur un instrument juste.

de l'accord-type. Il s'ensuit également qu'il ne peut point exister d'accords consonnants de trois sons dépassant l'octave, autres que ceux formés par les renversements des accords parfaits majeur et mineur. En effet, en déplaçant les sons d'un accord de ce genre, on pourrait le ramener entre les limites de l'octave, et on obtiendrait ainsi un nouvel accord consonnant compris dans l'octave, ce qui est impossible, puisque la méthode suivie dans la détermination des accords consonnants a dû donner tout ce qui peut se trouver dans l'octave. Néanmoins, les renversements des accords faiblement dissonnants, compris dans l'intérieur d'une octave, peuvent présenter quelquefois une dureté moindre que l'accord primitif. Ainsi l'accord $1 : \frac{7}{6} : \frac{7}{4}$ ou *ut*, *mi*♭–, *si*♭–, est faiblement dissonnant à cause de l'intervalle $1 : \frac{7}{6}$; l'intervalle $1 : \frac{7}{4}$ ou septième naturelle, ne sonne pas plus mal que la sixte mineure; l'intervalle $\frac{7}{6} : \frac{7}{4}$ est une quinte juste. Qu'on élève d'une octave le *mi*♭–, l'accord deviendra

$$1 : \frac{7}{4} : \frac{7}{3}.$$

Or $1 : \frac{7}{3}$ est un intervalle beaucoup plus doux que $1 : \frac{7}{6}$; il sonne même mieux que la dixième mineure de notre gamme mineure $1 : \frac{12}{5}$. L'accord ainsi formé, et donné sur mon harmonium, a, il est vrai, un caractère étrange dû aux intervalles inusités qu'il renferme, mais ne présente pas plus de dureté que le pire des accords consonnants mineurs, l'accord mineur de sixte et quarte. Cet accord *ut*, *si*♭ —, *mi*♭ —, est d'ailleurs troublé par les sons résultants sol_1 et fa_0. Ce ne serait naturellement pas la peine, pour favoriser isolément un accord de ce genre, qui ne peut être mis à côté que du pire de nos accords consonnants actuels, et qui n'est pas susceptible de renversement, ce ne serait pas la peine, dis-je, d'introduire dans les gammes usuelles les sons de cet accord qui n'entrent pas dans ces gammes.

Dans ces renversements des accords consonnants en dehors de l'octave, l'harmonie de l'accord se trouve modifiée en premier lieu par le changement des intervalles. Comme nous l'avons vu dans le précédent chapitre, les dixièmes majeures sonnent mieux que les tierces majeures, les dixièmes mineures moins bien que les tierces mineures, les treizièmes, ou sixtes augmentées d'une octave, moins bien que les sixtes ordinaires et surtout que les sixtes mineures. On peut résumer tous ces faits dans la règle suivante : *On améliore, en les agrandissant d'une octave, tous les intervalles dans le rapport numérique desquels*

le plus petit nombre est pair, parce que ce rapport devient plus simple :

la quinte..........	2 : 3	se transforme en douzième.........	2 : 6 = 1 : 3
la tierce...........	4 : 5	— — dixième..........	4 : 10 = 2 : 5
la tierce diminuée.	6 : 7	— — dixième diminuée.	6 : 14 = 3 : 7

Inversement, l'extension d'une octave rend moins bons les intervalles dont le plus petit nombre est impair, comme la quarte 3 : 4, la tierce mineure 5 : 6, les sixtes 3 : 5 et 5 : 8.

A cela, il faut encore ajouter l'influence des sons résultants principaux des intervalles considérés. Je donne ici encore une fois, un tableau des premiers sons résultants des intervalles consonnants compris dans une étendue de deux octaves. Les sons primaires sont encore représentés par des blanches, les sons résultants par des noires.



Le signe × désigne ici une différence de hauteur d'un peu moins d'un demi-ton ; les sons *si*♭ et *mi*♭ sont les septièmes naturelles de ut_0 et de fa_0. Au-dessous de la portée sont donnés les rapports numériques des intervalles ; la différence des deux nombres donne les vibrations du son résultant considéré.

Nous trouvons en premier lieu que les sons résultants de l'octave, de la quinte, de la douzième, de la quarte et de la tierce majeure, ne sont que la répétition à l'octave d'un des sons primaires, et n'ajoutent, par conséquent, rien de nouveau à l'accord. Ces cinq intervalles peu-

vent donc être employés dans les accords consonnants de toute nature, sans que les sons résultants y produisent de perturbation. A ce point de vue de la formation des accords, la tierce majeure est supérieure à la sixte majeure et à la dixième, quoiqu'elle leur soit inférieure à toutes deux sous le rapport de l'harmonie.

La double octave introduit comme son résultant une quinte. Par suite le redoublement à la double octave du son fondamental, ne trouble point l'accord. Le contraire aurait lieu pour le redoublement à la double octave de la tierce ou de la quinte de l'accord.

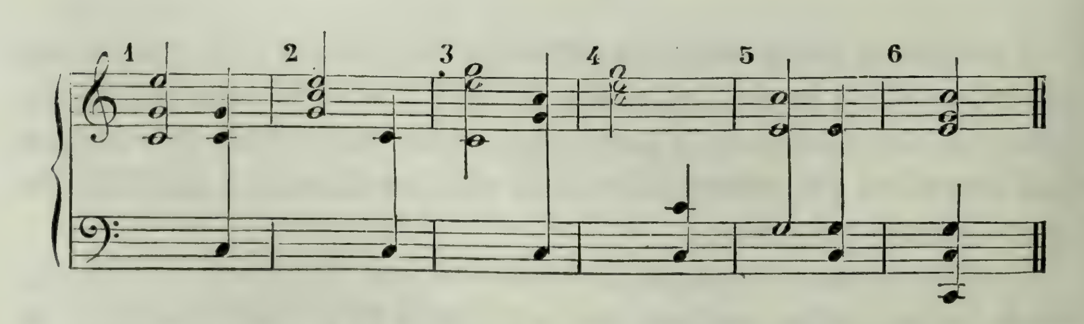
Nous trouvons ensuite une série d'intervalles qui forment des accords majeurs avec leur son résultant; aussi ce dernier gâte-t-il les accords mineurs et non les accords majeurs qu'il complète. Ce sont la onzième, la tierce mineure, la dixième majeure, la sixte majeure, la sixte mineure.

En revanche les dixièmes mineures et les deux espèces de treizièmes ne peuvent entrer dans aucun accord consonnant sans le troubler par leurs sons résultants.

Appliquons maintenant ces considérations à la construction des accords de trois sons.

1. ACCORDS MAJEURS DE TROIS SONS.

On peut disposer les accords majeurs de manière que les sons résultants restent entièrement compris dans l'accord. On obtient ainsi les renversements les plus harmonieux de l'accord. Pour les trouver, il faut remarquer qu'il n'y peut entrer ni dixièmes mineures, ni treizièmes d'aucun genre, et que, par conséquent, les tierces mineures et toutes les sixtes ne doivent jamais subir d'extension. En mettant à la partie supérieure la tierce, puis la quinte, puis le son fondamental, on trouve les renversements suivants dans lesquels les sons résultants ne troublent en rien l'harmonie des accords qui ne dépassent pas deux octaves; les sons résultants sont toujours représentés par des noires.



Quand la tierce est en haut, la quinte ne peut être placée au-dessous d'elle de plus d'une sixte majeure, autrement on aurait une

treizième; mais on peut faire varier la position du son fondamental. Aussi les renversements 1 et 2 sont-ils les seuls où, la tierce faisant la partie supérieure, l'accord ne soit point troublé. Quand la quinte est en haut, la tierce doit être immédiatement au-dessous d'elle, autrement nous aurions une dixième mineure; la position du son fondamental peut varier. Enfin, si ce dernier fait la partie supérieure, la tierce ne peut être placée au-dessous de lui que d'une sixte mineure, la quinte est libre. Il en résulte que les seuls renversements de l'accord majeur entièrement exempts de l'influence perturbatrice des sons résultants sont ceux indiqués ci-dessus, parmi lesquels se retrouvent les trois déjà déterminés 2, 4 et 6, et trois autres nouveaux dépassant l'octave, savoir, 1, 3 et 5. Deux de ces derniers, 1 et 3 ont le son fondamental à la basse comme l'accord-type, et peuvent être considérés comme ses extensions; le troisième, c'est-à-dire 5, a la quinte en bas comme l'accord de sixte et quarte 2. L'accord de sixte 6, au contraire, n'est susceptible d'aucune extension.

On peut ranger ces accords par ordre de douceur d'après les intervalles qui les constituent. Les trois intervalles formant le premier accord, savoir la quinte, la dixième majeure et la sixte majeure, sont les meilleurs; les trois intervalles formant le dernier accord, savoir la quarte, la tierce mineure et la sixte mineure, sont relativement moins bons que tous les autres considérés ici.

Les autres renversements des accords majeurs de trois sons donnent, il est vrai, des sons résultants isolés non compris dans l'accord, et, sur un instrument accordé selon la gamme naturelle, présentent une dureté sensiblement plus forte que les précédents; ils ne sont pourtant pas dissonnants, mais se rangent dans la même catégorie que les accords mineurs. On obtient ainsi tous les renversements possibles compris dans une étendue de deux octaves; ces renversements moins bons, sont les suivants faisant suite à la série de 1 à 6 :

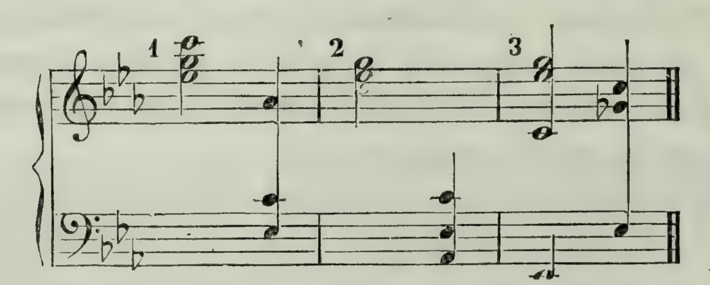


Les musiciens y reconnaîtront tout de suite les renversements les moins usités de l'accord majeur; les nos 7, 8, 9 et 10 présentent par leur son résultant *si* ♭, une certaine ressemblance avec l'accord de

septième dominante, *ut*, *mi*, *sol*, *si* ♭, du ton de *fa* majeur ; les moins agréables de tous ces renversements sont les deux derniers, 11 et 12, qui, par le fait, présentent une dureté sensiblement plus grande que celle des meilleurs accords mineurs.

2. ACCORDS MINEURS DE TROIS SONS.

On ne peut jamais disposer les accords mineurs de manière à les débarrasser entièrement de sons résultants faux, parce qu'on ne peut trouver pour la tierce et le son fondamental une position qui ne donne pas un son résultant non compris dans l'accord mineur. Pour que ce dernier soit seul, les deux sons *mi* ♭ et *sol* de l'accord mineur d'*ut* doivent être aussi rapprochés que possible, à la distance d'une tierce majeure ; dans toute autre position ils donneraient lieu à un autre son résultant non compris dans l'accord. Pour les deux sons *ut* et *sol*, on ne doit rejeter que l'intervalle de onzième où ils se trouveraient former un accord majeur avec le son résultant. Dans ces conditions, les trois renversements suivants de l'accord mineur sont les seuls possibles :



Les autres qui sonnent moins bien sont les suivants :



Les renversements, du n° 4 au n° 10, contiennent deux sons résul-

tants faux, produits l'un par les sons *ut* et *mi*♭, et le second, dans le nº 4, par la onzième *sol*, *ut*, et dans les autres par la tierce majeure *mi*♭, *sol*. Les deux derniers renversements, 11 et 12, sont les plus mauvais, parce qu'ils contiennent chacun trois sons résultants faux.

On peut apprécier aussi l'influence des sons résultants dans la comparaison des divers renversements. Ainsi le renversement 3 où se trouvent une dixième mineure et une tierce majeure, sonne sensiblement mieux que le renversement 7 qui contient une dixième et une sixte majeures, bien que ces deux intervalles pris isolément sonnent mieux que les deux premiers. L'infériorité de l'accord 7 tient donc uniquement à la présence du second son résultant faux.

L'influence des mauvais sons résultants se montre aussi dans la comparaison avec les accords majeurs. Si on compare les accords mineurs de 1 à 3, qui, chacun, ne contiennent qu'un mauvais son résultant, avec les accords majeurs 11 et 12 qui en ont chacun deux, on trouve que, par le fait, ces accords mineurs sont plus agréables et moins durs que les accords majeurs dont il s'agit. Dans ces deux catégories d'accords, ce n'est donc ni la tierce majeure ou mineure, ni la nature du son, qui déterminent le degré d'harmonie, mais les sons résultants.

ACCORDS DE QUATRE SONS.

Il est facile de se rendre compte, que tous les accords consonnants de quatre sons ne sont jamais que des accords de trois sons majeurs ou mineurs, dans lesquels un des sons est redoublé à l'octave.

En effet, tout accord consonnant de quatre sons doit se transformer en accord consonnant de trois sons, toutes les fois que nous lui ôtons un son. Nous pouvons le faire de différentes manières, en ôtant successivement chacun des sons de l'accord de quatre sons. On peut, par exemple, de l'accord *ut*, *mi*, *sol*, ut_1, tirer les trois accords suivants :

ut, *mi*, *sol*,   *mi*, *sol*, ut_1,
ut, *mi*, ut_1,   *ut*, *sol*, ut_1.

Mais tous les accords consonnants ainsi formés, et ne présentant pas de notes redoublées, doivent être majeurs ou mineurs, puisqu'il n'y a pas d'autres accords consonnants. Si on veut, au contraire, superposer un quatrième son à un accord majeur ou mineur, de manière à le transformer en accord consonnant de quatre sons, on ne peut y parvenir que par le redoublement d'un des trois sons qu'il renferme. En effet, tout accord de ce genre contient deux sons, que nous appellerons *ut* et *sol*, formant entre eux une quinte ordinaire ou ren-

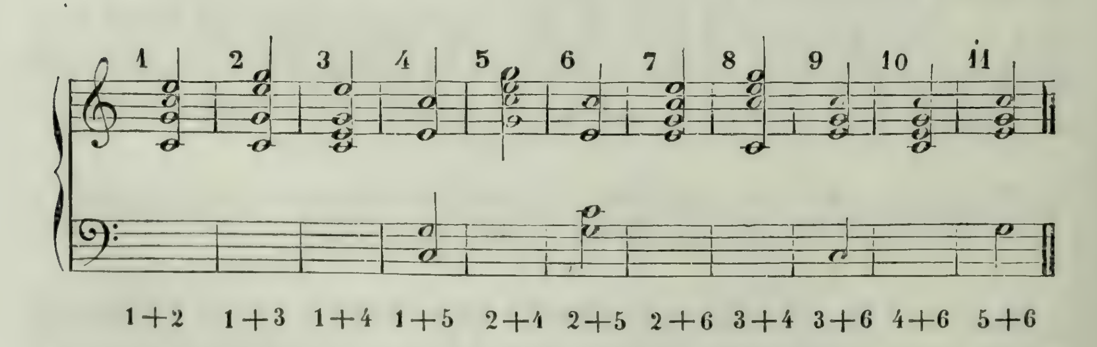
versée. Les seuls sons qui, associés à l'*ut* et au *sol*, puissent donner des accords consonnants, sont le *mi* et le *mi*♭; il n'en existe pas d'autre. Comme *mi* et *mi*♭ ne peuvent pas figurer ensemble dans un même accord consonnant, tout accord de ce genre de quatre ou plusieurs sons, qui renferme *ut* et *sol*, doit contenir le *mi* et les redoublements des autres sons, ou le *mi*♭ avec les redoublements des autres sons.

Donc, *tous les accords consonnants d'un nombre quelconque de notes, sont majeurs ou mineurs*, et peuvent être déduits de l'un ou de l'autre d'un des accords-types, par le renversement, ou le redoublement à l'octave de chacun des trois sons.

Pour trouver les meilleurs renversements des accords de quatre sons, nous devons faire attention à éviter entièrement les dixièmes mineures et les treizièmes mineures. La quinte ne peut donc être écartée de la tierce de l'accord de plus d'une tierce mineure en haut, et de plus d'une sixte en bas; le son fondamental ne peut s'en éloigner en haut de plus d'une sixte. Quand ces règles sont observées, l'autre condition, à savoir que la tierce et la quinte ne soient pas redoublées à la double octave, se trouve en même temps remplie. Ces règles peuvent se résumer en ces termes :

Les meilleurs accords majeurs sont ceux où la tierce se trouve à un intervalle d'une sixte au plus au-dessous du son fondamental, et au-dessus ou au-dessous de la quinte. Le son fondamental peut être d'ailleurs au-dessous de la tierce d'un intervalle aussi grand qu'on veut.

On trouve les meilleurs renversements des accords majeurs, en réunissant deux à deux les meilleurs renversements des accords de trois sons. Ce sont les suivants :



Les chiffres au-dessous de la portée se rapportent aux renversements précédemment indiqués des accords de trois sons.

On voit que les accords de sixte sont ceux qui doivent être entièrement compris dans l'espace le plus restreint, comme le nº 7 ; les accords de sixte et quarte ne peuvent dépasser l'étendue d'une onzième, mais, dans ces limites, présentent les trois renversements 5, 6 et 11.

Les accords qui ont le son fondamental à la basse, sont ceux qui laissent le plus de liberté.

Il ne sera pas nécessaire d'énumérer ici les renversements moins bons des accords majeurs. Le nombre des mauvais sons résultants ne peut pas dépasser deux, comme cela a lieu dans le renversement 11 des accords de trois sons. Dans les accords majeurs d'*ut*, de trois sons, on ne trouve généralement que les deux sons résultants faux *si*♭ et *fa*×.

Les accords mineurs de quatre sons, comme ceux de trois sons, doivent avoir toujours au moins un son résultant faux. Mais il n'y a qu'un seul renversement de l'accord mineur de quatre sons, qui n'en présente pas plus d'un ; c'est le n° 1 de l'exemple noté qui va suivre, formé par des renversements 1 et 2 de l'accord mineur de trois sons. Le nombre des sons résultants faux peut s'élever jusqu'à 4, en associant, par exemple, les renversements 10 et 11 des accords de trois sons.

On trouvera ci-dessous le tableau des accords mineurs de 4 sons qui ne présentent pas plus de 2 sons résultants faux, et restent compris dans une étendue de deux octaves. On n'a figuré par des noires que les sons résultants faux ; ceux qui ne dénaturent pas l'accord n'ont pas été inscrits.



L'accord de sixte et quarte ne peut entrer que dans les limites resserrées du renversement n° 5 ; l'accord de sixte peut s'employer dans les trois renversements 9, 3 et 6, c'est-à-dire dans ceux qui ne dépassent pas l'étendue d'une dixième, l'accord fondamental trois fois

avec l'octave redoublée (1, 2, 4), et deux fois avec la quinte redoublée (7 et 8).

Dans les théories musicales adoptées jusqu'ici, on a assez peu parlé de l'influence des renversements de l'accord sur sa douceur. On donnait ordinairement la règle de ne pas employer les petits intervalles à la basse, et de répartir les intervalles assez régulièrement entre les sons extrêmes ; ces règles ne sont même pas des conséquences de vues théoriques émises et de lois posées ; d'après celles-ci, l'intervalle consonnant demeure toujours tel dans quelque région de la gamme, dans quelque renversement ou enchaînement que ce soit. C'était donc plutôt une dérogation pratique aux règles générales. C'était au musicien à se faire, par l'étude et l'expérience, une idée des impressions diverses produites par les différents renversements des accords. On ne savait donner aucune règle là-dessus.

Je ne me suis étendu aussi longuement qu'on vient de le voir sur ce sujet, que pour montrer que, par la détermination exacte de la cause des consonnances et des dissonnances, nous pouvons trouver la règle de phénomènes que l'harmonie n'avait pu jusqu'ici faire rentrer dans ses préceptes.

Mais les règles posées par nous concordent avec la pratique des meilleurs compositeurs, de ceux en particulier qui ont dirigé leurs études musicales, principalement sur la musique vocale, avant que le grand développement de la musique instrumentale n'eût forcément généralisé l'emploi du tempérament ; c'est ce dont on se convaincra facilement par l'examen des morceaux qui produisent sur nous l'impression la plus complétement harmonieuse. De tous les compositeurs, Mozart est bien celui qui a eu l'instinct le plus sûr au point de vue de la délicatesse de la facture. Parmi ses morceaux de chant, son *Ave verum corpus* est particulièrement célèbre par l'admirable pureté et la douceur de l'harmonie. En examinant ce court morceau comme l'un des exemples les mieux choisis, nous trouvons, dans sa première reprise, celle dont la douceur et le charme sont incomparables, des accords majeurs entremêlés d'accords de septième. Tous ces accords majeurs sont compris, parmi ceux désignés plus haut, comme parfaitement harmonieux. C'est le renversement n° 2 qui revient le plus souvent, puis les n°s 8, 10, 1 et 9. C'est dans la modulation finale de cette première reprise que figurent pour la première fois deux accords mineurs, et un accord majeur dans un renversement moins bon. Ce qu'il y a de très-frappant, quand on compare cette première reprise avec la seconde, dont l'expression est plus sombre, plus extatique, plus mystique, et dont les modulations présentent une marche plus hardie, des dissonnances plus dures, c'est qu'il y entre beaucoup

plus d'accords mineurs employés, ainsi que les accords majeurs parsemés çà et là, surtout dans les moins bons renversements, jusqu'à l'accord final où l'harmonie reparaît dans toute sa plénitude.

On peut faire des observations tout à fait analogues sur les chœurs de Palestrina, de ses contemporains et de ses successeurs, tant qu'ils se bornent à une simple construction harmonique, sans polyphonie compliquée. Dans la réforme de la musique d'Église romaine, accomplie par Palestrina, c'était l'expression harmonieuse qui devait dominer le plus, par opposition à la polyphonie dure et peu intelligible de l'ancienne manière flamande ; en réalité, Palestrina et son école ont résolu ce problème de la façon la plus complète. On y trouve une succession presque ininterrompue d'accords consonnants, entremêlés de rares septièmes ou notes de passage dissonnantes. Ici, encore, les accords consonnants sont pris presque exclusivement parmi les accords majeurs ou mineurs que nous avons désignés comme les plus harmonieux. Ce n'est que dans les cadences finales de chaque reprise que se trouvent, au contraire, en majorité, entremêlés de dissonnances plus fortes et plus nombreuses, les moins bons renversements de l'accord majeur et mineur, en sorte que, pour arriver à l'expression que la musique moderne obtient au moyen des divers accords dissonnants, surtout par l'emploi fréquent des accords de septième, l'école de Palestrina faisait usage des nuances beaucoup plus délicates, provenant des divers renversements de l'accord consonnant. C'est ce qui explique l'harmonie empreinte de profondeur et de délicatesse de ces morceaux ; on dirait du chant des anges dont le cœur est ému des douleurs terrestres sans être troublé dans sa céleste sérénité. Une musique de ce genre exige naturellement, chez les chanteurs et les auditeurs, une oreille délicate pour apprécier, à leur juste valeur, les nuances délicates de l'expression, parce que la musique moderne nous a habitués à des moyens d'expression plus énergiques et plus dramatiques.

Dans le *Stabat mater* de Palestrina, je trouve surtout les renversements 1, 10, 8, 5, 3, 2, 4, 9, des accords majeurs de 4 sons, et les renversements 9, 2, 4, 8, 3, 5, 1, des accords mineurs. Pour les accords majeurs, on pourrait peut-être encore supposer qu'il était amené par quelque règle théorique à éviter les mauvais intervalles de dixième mineure et de treizième. Mais, pour les accords mineurs, une règle de ce genre serait tout à fait inapplicable. Comme on ne savait rien alors des sons résultants, nous devons conclure que Palestrina a été seulement guidé par la finesse de son oreille, qui lui donnait des indications en parfait accord avec les règles théoriques posées par nous.

Les autorités que je viens de citer doivent prouver aux musiciens

l'exactitude de ma classification des accords consonnants d'après leur harmonie. On peut d'ailleurs, à chaque instant, se convaincre de cette exactitude sur un instrument accordé selon la gamme naturelle. Avec le tempérament usité aujourd'hui, les nuances les plus fines se confondent un peu, sans se perdre tout à fait cependant.

Après avoir terminé ici la partie de nos recherches qui repose sur des principes purement scientifiques, il est à propos de jeter un coup d'œil rétrospectif sur le chemin parcouru, pour se rendre compte des résultats acquis, et pour voir dans quelle mesure ils s'accordent avec les vues des anciens théoriciens. Nous sommes partis de phénomènes acoustiques, les sons résultants et les battements. Ces phénomènes étaient, depuis longtemps, connus aussi bien des musiciens que des acousticiens; de même, les lois selon lesquelles ils se produisent étaient exactement connues et posées dans leurs traits essentiels. Nous avons eu seulement besoin de suivre chacun de ces phénomènes plus loin qu'on ne l'avait fait jusqu'ici. Nous sommes arrivés à trouver des méthodes qui rendent relativement facile l'observationdes harmoniques, si difficile jusqu'ici; à l'aide de ces méthodes, nous nous sommes efforcés de démontrer, qu'à peu d'exceptions près, les sons de tous les instruments de musique sont accompagnés d'harmoniques; que les timbres, particulièrement favorables aux combinaisons musicales, présentent au moins une série d'harmoniques graves d'une assez grande intensité, tandis que les sons simples, comme ceux des tuyaux bouchés de l'orgue, produisent un effet musical très-peu satisfaisant. Par contre, nous avons trouvé que, dans les meilleurs timbres musicaux, les sons partiels aigus, à partir du septième, doivent être faibles; autrement, le timbre, et surtout les assemblages de sons, présenteraient trop de mordant.

En ce qui concerne les battements, le problème consistait à déterminer l'effet qu'ils produisent lorsqu'on fait croître de plus en plus leur rapidité. Nous avons trouvé qu'ils se transforment alors en la dureté particulière à la dissonnance; on peut produire cette transformation peu à peu, l'observer dans toutes ses phases, et on voit facilement et clairement même, par la plus simple observation sensorielle, que l'essence de la dissonnance repose uniquement sur des battements très-rapides. Ceux-ci produisent, sur les nerfs de l'audition, une impression dure et désagréable, parce que toute excitation intermittente de nos appareils nerveux agit plus vivement qu'une excitation régulière et durable.

Peut-être à cela vient-il se joindre une cause psychologique : nous pouvons, il est vrai, constater l'existence des secousses sonores, dans un ensemble de sons formant une dissonnance, mais, si elles sont rapides, nous les percevons sans pouvoir cependant les distinguer et les compter isolément ; aussi forment-elles une masse sonore confuse que nous ne pouvons pas séparer clairement en éléments isolés. La dureté et la confusion, présentées par la dissonnance, nous paraissent être la cause de l'impression désagréable qu'elle produit.

Nous pouvons brièvement indiquer le sens de cette distinction : *La consonnance est une sensation continue*, *et la dissonnance une impression intermittente.* Deux sons consonnants résonnent régulièrement l'un à côté de l'autre, sans provoquer l'un dans l'autre des perturbations réciproques ; deux sons dissonnants se divisent en une série de secousses sonores isolées. Cette description du phénomène correspond parfaitement à l'ancienne définition d'Euclide : « La consonnance est l'association de deux sons, l'un aigu, l'autre grave. La dissonnance, au contraire, est l'inaptitude de deux sons à s'associer sans produire une impression dure sur l'oreille (1). »

Ce principe une fois trouvé, il ne restait plus qu'à rechercher dans quels cas et avec quelle intensité, des battements pouvaient se produire dans toutes les combinaisons possibles, soit par les sons partiels, soit par les sons résultants de divers ordres. Cette recherche n'avait guère été effectuée jusqu'ici que par Scheibler, pour les sons résultants de deux sons simples ; les lois bien connues des battements permettaient de l'exécuter sans difficulté pour les sons complexes. Toute déduction théorique dans ce domaine peut être à chaque instant vérifiée par une observation bien exécutée, surtout en facilitant l'analyse de la masse sonore par l'emploi des résonnateurs. Tous ces battements des harmoniques et des sons résultants, dont nous avons tant parlé dans le dernier chapitre, ne sont pas les inventions de creuses spéculations théoriques ; ce sont des faits d'observation qui peuvent être facilement constatés par tout observateur exercé, au moyen d'une expérience bien faite. La connaissance de la loi acoustique nous facilite la découverte plus prompte et plus rapide des phénomènes dont il s'agit. Mais toutes les propositions sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour faire la théorie des consonnances et des dissonnances, telle qu'elle vient d'être donnée dans le dernier chapitre, reposent uniquement sur une analyse minutieuse des sensations de l'oreille. Cette analyse aurait pu être faite par toute oreille exercée, sans le secours de la

(1) *Euclides*, ed. Meibomius, p. 8 : Ἔστι δὲ συμφονία μὲν κρᾶσις δύο φθόγγων, ὀξύτερον καὶ βαρύτερον. Διαφωνία δὲ τοὐναντίον δύο φθόγγων ἀμιξία, μὴ οἵων τε κραθῆναι, ἀλλὰ τραχυνθῆναι τὴν ἀκοήν.

théorie, mais le fil conducteur de la théorie et l'emploi de moyens d'observations appropriés l'ont facilitée dans une proportion extraordinaire.

Je prie surtout le lecteur de remarquer que l'hypothèse sur la vibration par influence des organes de Corti n'a aucun rapport immédiat avec l'explication de la consonnance et de la dissonnance, qui repose uniquement sur des faits d'observation, sur les battements des sons partiels et des sons résultants. J'ai cru pourtant ne pas devoir supprimer cette hypothèse, que, naturellement, nous ne pouvons cesser d'envisager comme telle, parce qu'elle résume, en un seul point de vue, tous les phénomènes acoustiques auxquels nous avons affaire, et donne de l'ensemble une explication claire et facile à comprendre.

Les derniers chapitres ont prouvé que l'analyse exacte et minutieuse de la masse sonore, au moyen des principes qu'on vient de rappeler, conduit aux mêmes distinctions entre les intervalles et les accords consonnants et dissonnants que les traités d'harmonie parus jusqu'ici. Nous avons même montré que nos recherches fournissent, sur les intervalles isolés et la forme des accords, des données encore plus précises que ne pouvaient le faire les règles générales des traités d'harmonie; nos déductions dans cet ordre ont été confirmées, aussi bien par l'observation sur des instruments donnant la gamme naturelle que par l'exemple des meilleurs compositeurs.

Ne suis-je donc pas en droit de prétendre que, dans les recherches en question, sont exposées les causes véritables et suffisantes de la consonnance ou de la dissonnance des sons musicaux, basées sur une analyse exacte des sensations auditives et sur des principes non esthétiques, mais purement scientifiques?

Un point pourrait peut-être éveiller le doute dans l'esprit des musiciens. Nous avons trouvé que, des plus parfaites consonnances aux diverses dissonnances, il existe une série continue de degrés, d'assemblages de sons dont la dureté augmente progressivement, en sorte qu'il n'y aurait point de séparation nettement tranchée entre les consonnances et les dissonnances ; le point où nous avons incliné à placer la limite parait assez arbitraire. Les musiciens, au contraire, séparent nettement les consonnances des dissonnances, et n'admettent point d'intermédiaires entre elles; c'est même ce qu'Hauptmann présente comme un obstacle fondamental à tout essai théorique sur la consonnance et la dissonnance, basé sur la considération des rapports numériques rationnels (1).

(1) *Harmonik und Metrik*, p. 4.

Par le fait, nous avons remarqué déjà plus haut que, dans beaucoup de timbres, l'intervalle de septième naturelle 4 : 7 et de dixième diminuée 3 : 7 sonnaient au moins aussi bien que la sixte mineure 5 : 8, et que le dernier intervalle 3 : 7 est, le plus souvent, meilleur que la consonnance assez imparfaite de dixième mineure 5 : 12. Mais nous avons déjà mentionné une circonstance, très-importante dans la pratique musicale, qui assure à la sixte mineure un avantage sur les intervalles formés avec le nombre 7. C'est que la sixte mineure donne comme renversement un très-bon intervalle, la tierce majeure; l'emploi de la note à titre de consonnance, dans la musique moderne, est particulièrement motivé par cette relation avec la tierce majeure; elle n'est essentiellement nécessaire, elle n'est admise que comme renversement de la tierce majeure. Au contraire, les intervalles formés avec le nombre 7, ne fournissent comme renversements que des intervalles pires qu'eux-mêmes. La nécessité, pour l'harmonie, de pouvoir renverser à volonté les parties serait donc déjà peut-être une raison d'établir une séparation entre la sixte mineure d'une part, et les intervalles déterminés par le nombre 7, d'autre part. D'ailleurs, ce qui a décidé cette séparation, à mon avis, c'est surtout la construction des gammes que nous étudierons à fond dans la troisième partie. La gamme de la musique moderne ne peut admettre dans son sein les sons déterminés par le nombre 7. Or, dans l'harmonie musicale, il ne peut être question d'assemblage qu'entre deux sons de la gamme. Les intervalles caractérisés par le nombre 5, c'est-à-dire les tierces et les sixtes, en font partie; il en est de même de ceux caractérisés par le nombre 9 comme la seconde majeure 8 : 9; mais, entre ces deux catégories, se trouvent les intervalles caractérisés par le nombre 7 qui doivent former la transition entre les deux. Il existe donc une véritable lacune dans la série des intervalles rangés suivant leur harmonie, et c'est cette lacune qui forme la limite entre les consonnances et les dissonnances.

Ici, par conséquent, ce n'est pas dans la nature des intervalles mêmes, mais dans la construction de l'ensemble de la gamme, que réside l'origine de la distinction entre ces deux catégories. Cela est confirmé par un fait historique : en réalité, la limite entre les intervalles consonnants et les intervalles dissonnants n'a pas toujours été la même. On a déjà dit plus haut que les Grecs avaient toujours rangé les tierces parmi les dissonnances; la tierce pythagoricienne 64 : 81, employée anciennement, n'était point, il est vrai, une consonnance, mais, plus tard, ils ont eu, selon Didyme et Ptolémée, la tierce naturelle 4 : 5, dans le mode dit syntonique-diatonique, sans la reconnaître comme une consonnance. On a dit aussi plus haut qu'au moyen,

âge, on avait reconnu d'abord les tierces, puis les sixtes comme des consonnances imparfaites, et que, pendant longtemps, on avait exclu complétement les tierces de l'accord final où plus tard on avait admis les tierces majeures, et, en tout dernier lieu, les tierces mineures. Il n'est pas exact de ne voir là, comme certains théoriciens modernes, qu'une bizarrerie contre nature, ou de supposer que les anciens compositeurs se laissaient guider avec une foi aveugle par l'autorité des Grecs. Dans une certaine mesure, cependant, cela a été le cas des auteurs qui ont écrit sur la théorie musicale jusqu'au seizième siècle. Mais il faut faire une distinction entre les compositeurs et les théoriciens. Ni les Grecs, ni les grands compositeurs du seizième et du dix-septième siècle, n'étaient hommes à se laisser enchaîner par une théorie qu'aurait contredite leur oreille. La cause de ces divergences réside plutôt dans la différence que présente le système des modes, dans l'antiquité et dans les temps modernes; nous apprendrons à la mieux connaître dans la troisième partie. On y verra que notre système moderne a pris sa forme actuelle, surtout sous l'influence de l'emploi, devenu général, de la musique harmonique à plusieurs parties. Ce n'était que dans ce système qu'on pouvait satisfaire d'une manière complète à toutes les exigences de l'enchaînement harmonique; et comme cet enchaînement est beaucoup plus rigoureux que dans les systèmes anciens, non-seulement nous pouvons nous permettre une grande liberté dans l'emploi des consonnances imparfaites et des dissonnances, mais même le système actuel exige souvent, surtout dans les cadences finales, d'où elles étaient autrefois bannies, la présence des tierces pour distinguer le majeur du mineur.

Cette variation des limites entre les consonnances et les dissonnances, avec les modifications du système des gammes, prouve bien que la détermination de ces limites résulte non pas des intervalles et de leur harmonie, mais de l'ensemble de la construction des gammes.

Quant au problème posé depuis 2500 ans par Pythagore à la science des causes, concernant le lien qui unit les consonnances aux rapports des petits nombres entiers, sa solution est donnée par ce fait, que l'oreille décompose un son complexe en vibrations pendulaires, suivant les lois de la vibration par influence. C'était exprimé mathématiquement par la loi de Fourier qui nous apprend que toute quantité, périodique de sa nature, est exprimée par une somme de quantités périodiques très-simples (1).

Les longueurs des périodes des termes de cette somme sont exactement déterminées par la condition suivante : une, deux, trois, qua-

(1) Le sinus et le cosinus de la quantité variable.

tre, etc., de ces périodes, doivent être égales à la période de la quantité donnée, ce qui, appliqué au son, veut dire que les nombres de vibrations des harmoniques doivent être exactement deux, trois, quatre, etc., fois aussi grands que le nombre de vibrations du son fondamental. Voilà l'origine des nombres entiers qui déterminent les rapports de consonnance. Nous avons vu, en effet, que la condition, pour qu'il y ait consonnance, consiste dans la coïncidence de deux des harmoniques graves des notes simultanément émises ; si cette condition n'est pas remplie, la consonnance est détruite par des battements. Donc, l'origine des rapports rationnels donnés par Pythagore se trouve, en dernière analyse, dans la loi de Fourier, qui, dans un certain sens, peut être considérée comme le fondement de l'harmonie.

La relation entre les nombres entiers et les consonnances a été, dans l'antiquité, au moyen âge et chez les peuples orientaux, l'objet de spéculations fantastiques et extravagantes. « Tout est nombre et harmonie » était la loi fondamentale et caractéristique de la science pythagoricienne. On croyait trouver ces mêmes rapports numériques des sept sons de la gamme diatonique, entre les distances des corps célestes au feu central. De là cette harmonie des sphères que Pythagore, seul parmi les hommes, avait dû entendre, à en croire ses disciples. Dans les temps les plus reculés, les spéculations des Chinois sur les nombres se sont égarées à peu près aussi loin. Dans le livre de Tso-Kiu-Ming, un ami de Confucius (500 ans avant J.-C.), on rapproche les cinq sons de l'ancienne gamme des Chinois des cinq éléments de leur philosophie naturelle (l'eau, le feu, le bois, le métal et la terre). Les nombres 1, 2, 3 et 4, sont désignés comme la source de toute perfection. Plus tard on rapprocha les douze demi-tons de l'octave des douze mois de l'année, etc. On trouve en foule des rapprochements analogues entre les sons et les éléments, les climats, les constellations, chez les auteurs arabes, qui ont écrit sur la musique. L'harmonie des sphères joue un grand rôle dans tout le moyen âge : selon Athanasius Kircher, le macrocosme et le microcosme font également de la musique ; un esprit aussi profondément scientifique que l'était Keppler, ne pouvait se débarrasser entièrement de ce genre d'hypothèse ; de nos jours même, elle exerce encore certains esprits philosophiques plus disposés à l'imagination qu'au travail scientifique.

C'est plus sérieusement et d'une manière plus scientifique, que le célèbre mathématicien Euler (1) a essayé de faire reposer, sur des considérations psychologiques, cette relation des consonnances avec les nombres entiers, et le point de vue où il s'est placé peut bien être con-

(1) *Tentamen novæ theoriæ musicæ*. Petropoli, 1739.

sidéré comme celui qui convenait le mieux aux savants du siècle dernier, bien qu'il ne puisse passer pour une solution complète. Euler (1) commence par supposer que nous sommes agréablement affectés par toutes les choses où nous découvrons une certaine perfection. La perfection d'une chose serait déterminée par l'appropriation de tous ses éléments à sa destination finale. Il s'ensuivrait que, partout où il y a perfection, il devrait y avoir aussi ordre; car l'ordre consiste en ce que toutes les parties soient rangées d'après une certaine règle, qui permette de déterminer pourquoi telle partie se trouve à telle partie plutôt qu'à toute autre. Dans tout ensemble où réside la perfection, une règle de ce genre devrait être déterminée par tous les éléments de la destination finale prépondérante. Aussi l'ordre plairait-il plus que le désordre. Mais nous pourrions avoir le sentiment de l'ordre de deux manières : soit en connaissant la loi d'où se déduit la règle de la disposition, et comparant les conséquences de la loi avec la disposition observée, soit en cherchant à remonter de la disposition connue des éléments à la loi inconnue qui la régit. C'est ce dernier cas qui se rencontrerait dans la musique. Un assemblage de sons ne pourrait nous plaire que si nous savions trouver la loi de leur disposition. Ici, il pourrait bien se faire qu'un auditeur sût trouver cette loi, mais qu'un autre n'y pût arriver, de manière que les deux jugements portés par eux fussent différents.

Plus nous percevons facilement l'ordre qui réside dans l'objet considéré, plus nous le trouvons simple, parfait, et plus nous le considérons comme aisé et satisfaisant. Au contraire, l'ordre que nous aurons quelque peine à découvrir, nous causera un plaisir mêlé d'un certain sentiment de peine et d'abattement (*tristitia*).

Dans les sons, il y a deux éléments où l'ordre peut se manifester : ce sont la hauteur et la durée. Pour la hauteur, l'ordre se montre dans les intervalles ; pour la durée, dans le rhythme. Il pourrait aussi y avoir un certain ordre dans l'intensité ; mais là, il nous manquerait un terme de comparaison. De même que, dans le rhythme, deux, trois, ou quatre notes égales de l'une des parties peuvent coïncider avec deux ou trois notes de l'autre partie, et que nous pouvons facilement apprécier la régularité d'un semblable groupement, surtout lorsqu'il se répète souvent ; de même, aussi, nous serions plus agréablement affectés si nous constations que deux, trois ou quatre vibrations de l'un des sons coïncident avec deux ou trois de l'autre, que si le rapport des durées de vibrations se présentait comme irrationnel ou formé par de grands nombres. Il s'ensuit que l'assemblage de deux

(1) *Loc. cit.*, cap. II, § 7.

sons nous plairait d'autant plus, que le rapport numérique de leurs durées de vibrations serait exprimé par des nombres entiers plus simples. Euler remarque également que nous pouvons supporter des rapports numériques plus compliqués, et, par suite, des consonnances moins parfaites dans les régions aiguës que dans les régions graves, parce que, dans le haut, les groupes de vibrations se répètent plus souvent dans le même temps, ce qui nous permet d'apprécier plus facilement la régularité d'une disposition même plus compliquée.

Euler développe à ce sujet une règle arithmétique d'après laquelle le degré d'harmonie, d'un intervalle ou d'un accord, peut être déduit du rapport numérique caractérisant l'intervalle. L'unisson occupe le premier degré, l'octave le second, la douzième et la double octave le troisième, la quinte le quatrième, la quarte le cinquième, la dixième majeure et la onzième le sixième, la sixte et la tierce majeures le septième, la sixte et la tierce mineures le huitième, la septième naturelle 4 : 7 le neuvième, etc. L'accord majeur de trois sons, dans son plus petit renversement, et l'accord de sixte occupent également le neuvième degré. L'accord de sixte et quarte est au dixième degré. De même l'accord mineur type et l'accord mineur de sixte occcupent le neuvième, et l'accord mineur de sixte et quarte le dixième degré. Dans ce rangement des accords, les conséquences du système d'Euler concordent assez bien avec nos résultats, excepté dans le rang de l'accord majeur et de l'accord mineur, où il n'a pas été tenu compte de l'influence des sons résultants. Aussi, dans ce système, les deux accords types apparaissent-ils comme également harmonieux, bien que, d'autre part, l'accord de sixte en majeur et l'accord de sixte et quarte en mineur doivent être changés de place, suivant nous (1).

Euler a appliqué ces conditions non-seulement aux consonnances

(1) Je vais donner ici le principe d'après lequel Euler détermine les degrés occupés par les intervalles et les accords, parce qu'il se vérifie bien dans la réalité, toutes les fois que les sons résultants n'entrent pas en jeu. Si p est un nombre premier, Euler admet que son numéro d'ordre est le même nombre p. Le numéro d'ordre d'un produit de deux facteurs a et b, dont les numéros respectifs sont α et β, est égal à $\alpha + \beta - 1$. S'agit-il de trouver le rang d'un accord qui, réduit aux nombres les plus faibles, peut être mis sous la forme $p : q; r : s$, etc., Euler cherche le plus petit nombre contenant à la fois les facteurs p, q, r, s, etc., son numéro d'ordre donne le rang de l'accord.

Ainsi, par exemple :

Le rang de 2 est 2,
— de $3 = 3$,
— de $4 = 2.2 = 2 + 2 - 1 = 3$,
— de $12 = 4.3 = 3 + 3 - 1 = 5$,
— de $60 = 12.5 = 5 + 5 - 1 = 9$.

Le rang de l'accord 4 : 5 : 6 est donné par le numéro d'ordre de 60, multiple exact de 4, de 5 et de 6.

et aux accords isolés, mais aussi aux successions d'accords, à la construction des gammes, aux modulations, et il en tire une foule de propriétés surprenantes parfaitement exactes. Mais, abstraction faite de ce que le système d'Euler laisse sans explication ce fait, qu'une consonnance un peu altérée sonne à peu près aussi bien qu'une consonnance juste, et mieux qu'une plus fortement altérée, quoiqu'en général le rapport numérique atteigne sa plus grande complication par une faible altération, la principale difficulté de l'hypothèse d'Euler consiste en ce qu'elle ne dit pas comment fait l'âme, pour arriver à percevoir le rapport numérique de deux sons simultanés. Nous devons supposer que l'homme, à l'état de nature, peut à peine s'expliquer que le son soit produit par des vibrations. Il y a plus ; pour arriver à reconnaître que les nombres de vibrations sont différents, qu'ils sont plus considérables dans le haut que dans le bas, qu'ils ont un rapport déterminé pour des intervalles déterminés, la perception immédiate par les sens ne fournit aucun moyen. Il existe, à la vérité, beaucoup de perceptions par les sens, où nous ne savons pas démêler comment nous avons fait pour arriver à reconnaître le fait en question ; quand, par exemple, nous concluons de la résonnance d'un espace à sa forme et à son volume, des traits du visage d'un homme à son caractère. Mais, dans ces derniers cas, nous avons fait, sur les relations qui réunissent ces divers éléments, une longue série d'expériences, d'où nous tirons un jugement par analogie, sans pouvoir nous représenter clairement sur quels faits isolés repose notre jugement. Il en est tout autrement des nombres de vibrations. Quiconque n'a pas fait d'expériences de physique, n'a jamais eu dans sa vie l'occasion d'apprendre quoi que ce soit sur les nombres de vibrations et leurs rapports. Et c'est dans ce cas pourtant que se trouvent, pendant toute leur vie, la majorité des hommes qui aiment la musique.

Il restait donc à indiquer les moyens par lesquels les rapports des nombres de vibrations pénètrent dans la sensation, deviennent sensibles. C'est ce que je me suis efforcé de déterminer, et, dans un certain sens, par conséquent, les résultats de la présente étude complètent ce qui manquait encore à l'hypothèse d'Euler. Mais, des phénomènes physiologiques qui rendent sensible la différence entre la consonnance et la dissonnance, ou, suivant Euler, entre le rapport ordonné et non ordonné des sons, il résulte, cependant, en définitive, une différence essentielle entre notre système d'explication et celui d'Euler. Selon ce dernier, l'âme doit percevoir directement les rapports rationnels des vibrations sonores ; selon nous, elle perçoit seulement un effet physique dû à ces rapports, la sensation continue ou intermittente des nerfs de l'audition. Le physicien sait que la sensation

d'une consonnance est continue, parce que les rapports numériques des vibrations sont rationnels, mais un morceau de musique ne porte rien de semblable à la connaissance d'un auditeur étranger à la physique, et, pour le physicien lui-même, un accord n'est pas rendu plus harmonieux par cette vue plus exacte des choses. Il en est tout autrement de l'ordre qui règne dans le rhythme. Avec quelque attention et sans instruction préliminaire, tout le monde peut apprécier qu'une ronde vaut exactement deux blanches, ou quatre noires. Le rapport rationnel des vibrations de deux sons simultanés, au contraire, produit sur l'oreille une action particulière qui le distingue des rapports irrationnels, mais cette distinction, entre la consonnance et la dissonance, repose sur des phénomènes physiques et non psychologiques.

Notre théorie se rapproche déjà davantage des considérations par lesquelles Rameau et d'Alembert, d'une part (1), et Tartini (2) de l'autre, ont expliqué la consonnance. Tartini fondait sa théorie sur l'existence des sons résultants, Rameau et d'Alembert sur l'existence des harmoniques. On voit qu'ils avaient trouvé le véritable point de vue, mais les connaissances acoustiques du siècle dernier n'étaient pas assez étendues pour leur permettre d'en tirer un nombre suffisant de conséquences. L'ouvrage de Tartini est écrit d'une façon si obscure et si vague, à en croire d'Alembert, que ce dernier et d'autres gens instruits ont trouvé impossible de former un jugement sur ce livre. L'ouvrage de d'Alembert, au contraire, est remarquablement clair ; c'est un modèle d'exposition, comme on pouvait en attendre d'un esprit si fin et si exact, qu'on doit ranger parmi les plus grands physiciens et les plus grands mathématiciens de son temps. Rameau et d'Alembert prennent pour point de départ deux faits qu'ils considèrent comme la base de leur système. Le premier consiste en ce que, pour tout corps sonore, au son fondamental (*générateur*), viennent se joindre la douzième et la tierce immédiatement au-dessus, comme harmoniques. Le second fait consiste en ce que tout le monde apprécie la ressemblance entre un son quelconque et son octave. Le premier fait prouverait que l'accord majeur est le plus *naturel* des accords, le second, que la quinte et la tierce peuvent être abaissées d'une ou deux octaves sans changer l'essence de l'accord, ce qui permet d'obtenir l'accord majeur dans ses divers renversements. On forme l'accord mineur en prenant trois sons qui ont tous trois un même harmonique commun, savoir, la quinte de l'accord (ut_0, $mi\flat_0$, sol_0, comptent

(1) *Éléments de musique*, suivant les principes de Rameau, par d'Alembert. Lyon, 1762.

(2) *Traité de l'harmonie*, 1754.

en effet sol_1 parmi leurs harmoniques). Aussi, l'accord mineur ne serait-il pas aussi parfait et aussi naturel que l'accord majeur, quoique également fourni par la nature.

Au milieu du siècle dernier, quand on commençait à beaucoup souffrir des maux d'un état social artificiel, il pouvait suffire de présenter une chose comme *naturelle*, pour prouver par là même sa beauté et sa nécessité ; nous ne voulons pas nier qu'en présence de la grande perfection de toutes les dispositions organiques du corps humain, de leur adaptation à un but déterminé, la preuve de l'existence, dans la nature, des rapports que Rameau avait trouvés entre les sons de l'accord majeur, ne doive être prise en grande considération, ne fût-ce que comme point de départ de recherches plus approfondies. Par le fait, comme nous pouvons le voir maintenant, Rameau avait eu parfaitement raison de penser que les faits dont il s'agit devaient être fondamentaux dans la théorie de l'harmonie. Mais tout n'est pas fini par là, car la nature présente également le Beau et le Laid, le Bien et le Mal. La preuve que quelque chose est dans la nature, ne suffit donc pas, à elle toute seule, à en rendre compte esthétiquement. En outre, en frappant des verges, des cloches, des membranes, en soufflant dans des cavités, Rameau aurait pu obtenir un grand nombre d'accords dissonnants, tout autres que ceux qu'il trouvait avec les cordes et les autres instruments de musique. Il aurait fallu, pourtant, les considérer comme naturels.

En second lieu, la ressemblance de l'octave, avec le son fondamental, sur laquelle s'appuie Rameau, est un phénomène musical qui a besoin d'explication, aussi bien que le phénomène de la consonnance.

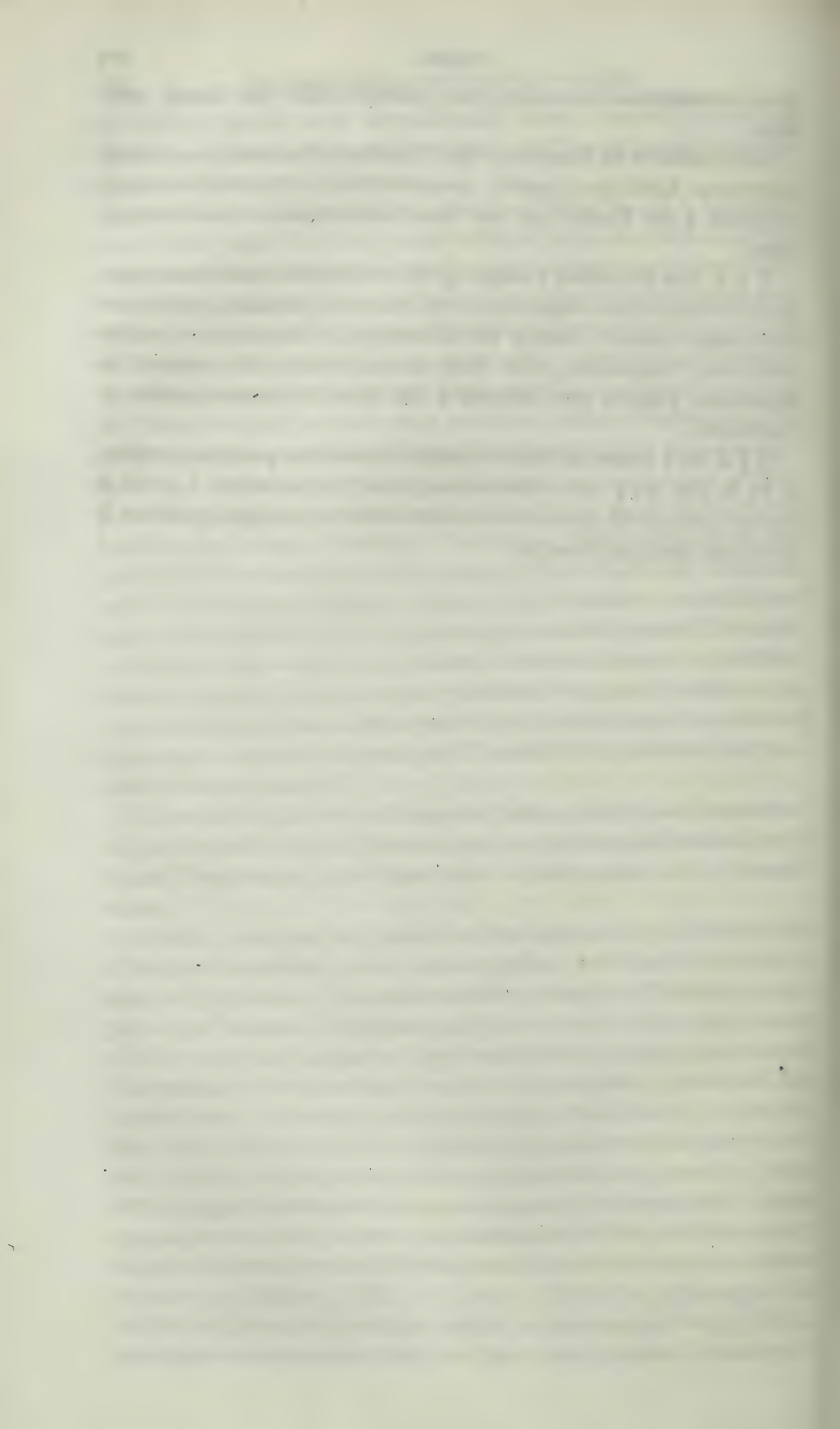
Au reste, personne n'a mieux vu les lacunes de ce système que d'Alembert lui-même. Aussi, dans sa préface, se défend-il très-nettement de l'expression : *Démonstration du principe de l'harmonie*, employée par Rameau. Il explique que, pour sa part, il n'a voulu donner qu'une exposition logique et bien coordonnée de toutes les lois de l'harmonie, en les rattachant à un fait fondamental, l'existence des harmoniques, qu'il admet sans se demander d'où il vient. Il se borne donc à la démonstration de la *naturalité* des accords majeur et mineur. Le livre ne fait pas mention des battements, et, par suite, de la différence particulière entre la consonnance et la dissonnance. A cette époque, on ne savait que très-peu de chose sur les lois des battements; les sons résultants venaient d'être portés à la connaissance des savants français par Romieu (1753) et Tartini (1754). En Allemagne, ils avaient été découverts quelques années auparavant par Sorge (1745), mais cette découverte ne s'était que bien peu répandue. Il manquait

donc les matériaux nécessaires pour pouvoir édifier une théorie complète.

Cette tentative de Rameau et de d'Alembert a pourtant une grande importance historique ; pour la première fois, la théorie de la consonnance a été fondée sur une base scientifique et non métaphysique.

Il y a lieu d'admirer l'usage qu'ils ont fait des matériaux épars qu'ils avaient à leur disposition, et la clarté, la précision, qu'a prises entre leurs mains la théorie de la musique, si inculte et si pénible avant eux. Nous aurons, plus tard encore, occasion de montrer les importants progrès que Rameau a fait faire à certaines parties de l'harmonie.

Si j'ai été à même de fournir quelque chose d'un peu plus complet, je ne le dois qu'à cette circonstance, que j'ai pu mettre à profit la grande quantité de travaux accumulés dans la physique, pendant le siècle qui vient de s'écouler.



TROISIÈME PARTIE

AFFINITÉS DES SONS

GAMMES ET TONALITÉS.

CHAPITRE XIII

APERÇU HISTORIQUE DES DIFFÉRENTS PRINCIPES QUI ONT PRÉSIDÉ A LA FORMATION DES DIFFÉRENTS STYLES, DANS LE DÉVELOPPEMENT DE LA MUSIQUE.

Jusqu'ici, nos études ont eu un caractère purement scientifique. Nous avons analysé les sensations auditives, et recherché les causes physiques et physiologiques des phénomènes observés, c'est-à-dire des harmoniques, des sons résultants et des battements. Dans tout ce domaine, nous n'avions affaire qu'à des phénomènes naturels, purement mécaniques, absolument soustraits à l'action de la volonté, qui doivent se produire exactement de la même manière chez tous les êtres vivants, dont l'oreille est construite d'après le même plan anatomique que la nôtre. Dans un domaine de cette nature, où règne la fatalité mécanique, et d'où tout arbitraire est exclu, on peut aussi demander à la science d'assigner aux phénomènes des lois invariables, et d'établir une étroite dépendance entre l'effet et la cause. Comme il n'y a rien d'arbitraire dans les faits qu'embrasse la théorie, il ne doit rester définitivement rien d'arbitraire dans les lois auxquelles ils sont soumis, dans les explications que nous cherchons à en donner. Tant qu'elles laisseraient subsister encore un peu d'incertitude, la science ne devrait pas considérer la question comme résolue, et, la plupart du temps, elle aurait aussi les moyens de faire disparaître l'arbitraire en poussant plus loin ses recherches.

Dans cette troisième partie, en faisant porter nos investigations principalement sur la Musique, en cherchant à expliquer les règles élémentaires des compositions musicales, nous mettons le pied sur un autre terrain, qui n'est plus purement scientifique, bien que les connaissances que nous avons acquises sur l'essence de l'ouïe trouvent encore ici de nombreuses applications. Nous abordons ici un problème qui, par essence, appartient au domaine de l'Esthétique. Si nous avons déjà parlé, dans la théorie des consonnances, d'intervalles ou accords *agréables* ou *désagréables*, il ne s'agissait que de l'impression sensorielle immédiatement produite sur l'oreille par une combinaison isolée de plusieurs sons, abstraction faite de toute considération de contraste ou d'expression artistique; il ne s'agissait que du

bien-être des sens, et non du Beau esthétique. Il faut soigneusement distinguer ces deux éléments, quoique le premier fournisse un moyen puissant d'arriver au but que poursuit le second.

La nature différente des sujets que nous allons traiter se manifeste déjà par un caractère distinctif tout extrinsèque, qui consiste en ce que nous nous heurtons, presqu'à chaque instant, à des variétés historiques ou nationales du goût. Une combinaison de sons simultanés peut être plus ou moins dure qu'une autre ; cela ne dépend que de la structure anatomique de l'oreille, et non de mobiles psychologiques. Mais le degré de dureté que l'auditeur consent à tolérer, comme un moyen d'expression musicale, dépend du goût et de l'habitude ; aussi la limite séparative entre les consonnances et les dissonnances a-t-elle beaucoup varié. De même aussi les gammes, les modes et les modulations ont subi de nombreuses modifications, et cela, non-seulement chez les peuples incultes ou sauvages, mais même dans les périodes historiques et chez les nations, où la civilisation humaine s'est épanouie dans toute sa fleur.

Il en résulte, et cette proposition n'est pas toujours prise en considération par les théoriciens et les historiens actuels de la musique, il en résulte, dis-je, que *le système des gammes, des modes et de leur enchaînement harmonique, ne repose pas sur des lois naturelles invariables, mais qu'il est, au contraire, la conséquence de principes esthétiques qui ont varié avec le développement progressif de l'humanité, et qui varieront encore.*

Il ne s'ensuit pas que le choix des éléments de la technique musicale soit purement arbitraire, et qu'ils ne puissent pas se déduire d'une loi plus générale. Au contraire, les règles de chaque style artistique forment un tout bien coordonné, surtout quand le style dont il s'agit est parvenu à un riche et complet développement. Ce n'est pas que les artistes édifient sciemment, et d'après un procédé logique, un système analogue de règles artistiques ; il se développe, au contraire, par de longs tâtonnements, par le jeu de l'imagination, quand l'artiste conçoit ou exécute ses œuvres tantôt d'une manière, tantôt d'une autre, et qu'il arrive peu à peu, à force de chercher, à obtenir ce qui le satisfait le mieux. Mais la science peut cependant s'efforcer de déterminer les mobiles, psychologiques ou techniques, qui ont agi dans cette recherche de l'artiste. Les mobiles psychologiques tombent dans le domaine de l'esthétique scientifique, les mobiles techniques, dans celui de la science. Quand on a défini d'une manière précise le but que poursuivent les artistes dans un style donné, ainsi que la direction principale de la route parcourue par eux, on peut déterminer ensuite plus ou moins exactement, pourquoi ils ont été forcés de suivre telle

ou telle règle, d'adopter tel ou tel moyen technique. La théorie musicale notamment, où des activités physiologiques particulières de l'oreille, non immédiatement accessibles à l'observation consciente, jouent un grand rôle, offre aux investigations esthétiques un champ vaste et fécond, pour déterminer le caractère de nécessité des règles techniques, qui président à chaque direction particulière prise par l'art, dans ses développements successifs.

Néanmoins, la définition du but principal poursuivi par chaque école artistique, et du principe fondamental de chaque style, n'est pas une question qui rentre dans les attributions de la science ; elle doit, au contraire, être résolue au moyen des résultats des recherches historiques et esthétiques.

La comparaison avec l'architecture qui, comme la musique, a pris des directions essentiellement différentes les unes des autres, permettra de rendre la chose plus claire. Dans leurs temples en pierre, les Grecs imitaient les constructions primitives en bois ; c'était là le principe fondamental de leur architecture. On reconnaît encore nettement, dans toute la structure et la disposition des ornements, cette imitation de la construction en bois. La position verticale des colonnes servant de support, et celle ordinairement horizontale de l'entablement, obligeaient toutes les parties secondaires à se disposer surtout suivant des lignes verticales ou horizontales. Des édifices de ce genre, dont les dimensions intérieures étaient naturellement très-limitées par la longueur des poutres ou des blocs de pierre en usage, suffisaient aux exigences du culte religieux des Grecs, dont les actes principaux s'accomplissaient en plein air. Les anciens Italiens (Étrusques), au contraire, découvrirent le principe de la voûte formée de pierres taillées en forme de coin. Cette invention, dans le domaine technique, permettait de couvrir, au moyen de voûtes, des édifices beaucoup plus vastes que ne pouvaient le faire les Grecs, avec leurs poutres en bois. Parmi ces constructions voûtées, on sait que les basiliques ont joué un grand rôle dans le développement ultérieur de l'architecture. Avec la voûte, l'arc en plein cintre fait son entrée dans l'art *roman* (*byzantin*), et forme le motif principal de la disposition et de l'ornementation générale. Les colonnes se transformèrent en piliers supportant un poids plus fort, auxquels vinrent se joindre, au moment de l'épanouissement complet de ce style, des colonnes de dimensions très-restreintes, et qui, à demi-encastrées dans la masse du pilier, contribuaient à l'ornementation en prolongeant, jusqu'en bas, les arêtes de la voûte qui rayonnaient de l'extrémité supérieure du pilier vers la toiture.

Dans la voûte, les pierres taillées en forme de coin pressent les unes contre les autres ; mais, comme la pression s'exerce régulièrement

vers l'intérieur pour toutes, chacune d'elles empêche, en réalité, les autres de tomber. La pression la plus forte, celle qu'il est le plus difficile de maintenir, est exercée par les pierres formant les portions horizontales de la voûte, qui ne trouvent plus ou presque plus de point d'appui dans les voussoirs voisins, et qui ne se maintiennent que grâce à leur forme particulière, et à l'épaisseur plus grande de leur partie supérieure. Aussi, dans les voûtes très-grandes, est-ce la portion horizontale centrale, qui offre le plus de dangers, celle qui entraîne tout dans sa chute, au moindre retrait des pierres voisines. Comme les édifices religieux du moyen âge prenaient des dimensions toujours plus considérables, on imagina de supprimer entièrement la portion moyenne horizontale de la voûte, et d'en prolonger les parties latérales, sous une moindre inclinaison, jusqu'à leur rencontre suivant une ogive.

A partir de ce moment, ce fut l'ogive qui domina, comme principe. L'édifice s'entoura extérieurement de contre-forts. Ces derniers, ainsi que l'ogive qui envahissait tout, donnaient naissance à des formes anguleuses; les églises étaient énormes à l'intérieur. Les deux choses correspondaient au sentiment énergique des peuples du Nord; peut-être même, ces formes élancées, surmontées des richesses de couleur et d'ornementation auxquelles se prêtent avec une logique admirable les dômes gothiques, servaient-elles précisément à rehausser encore l'impression de la force et de la puissance.

Nous voyons donc ici comment les inventions techniques surgissant en face de difficultés sans cesse grandissantes, ont donné successivement naissance aux trois principes de style tout à fait différents, de la ligne droite horizontale, du plein cintre et de l'ogive, et comment, à chaque modification du plan général de la construction, toutes les parties secondaires se sont successivement modifiées jusque dans leurs plus petits détails d'ornementation. Aussi ne peut-on comprendre les règles techniques particulières de chaque construction, qu'en remontant au principe général qui régit l'ensemble. Bien que le style gothique ait donné naissance aux formes architecturales les plus riches, les plus logiques, les plus puissantes, les plus saisissantes, à peu près comme notre système musical moderne, par rapport aux précédents, il ne viendra cependant à l'idée de personne de prétendre que l'ogive soit la forme naturelle et primitive de toute beauté architectonique, et qu'elle doive être employée partout. On sait bien aujourd'hui qu'il est absurde, au point de vue de l'art, de percer des fenêtres gothiques dans un édifice en forme de temple grec; de même, tout le monde peut malheureusement voir dans la plupart de nos églises gothiques, combien les petites chapelles construites à la Renaissance, dans le style grec ou roman, jurent avec l'ensemble de la construction.

Pas plus que l'ogive gothique, nous ne devons considérer notre gamme majeure comme un *produit de la nature;* ou, du moins, cela n'est admissible qu'en tant que toutes deux sont la conséquence nécessaire et naturelle du principe de style librement adopté. Et, si nous ne pouvons ajouter des ornements gothiques à un temple grec, nous ne pouvons pas davantage embellir les morceaux écrits dans les modes du plain-chant, en altérant les sons de manière à les faire rentrer dans notre gamme majeure ou notre gamme mineure. Jusqu'ici cependant, cette manière de comprendre le développement historique de l'art a fait encore peu de progrès chez nos musiciens, et même chez les historiens de la musique. Ils jugent, la plupart du temps, l'ancienne musique, d'après les règles de l'harmonie moderne, et inclinent à considérer toute infraction à ces dernières comme une simple maladresse des anciens, ou comme l'erreur d'un goût barbare (1).

Avant donc d'arriver à la construction des gammes et des règles de l'enchaînement harmonique, nous devons chercher à déterminer les principes du style, au moins dans les phases principales du développement de l'art musical. Pour l'objet qui nous occupe, nous pouvons distinguer trois périodes principales.

1° La *musique homophone* (à une seule partie) de l'antiquité, à laquelle se rattache la musique encore actuellement en usage chez les peuples orientaux et asiatiques.

2° La *musique polyphone* du moyen âge; elle admet plusieurs parties, mais sans attacher encore aucune importance à la signification individuelle des accords musicaux; son règne s'étend du dixième au dix-septième siècle, époque à laquelle elle se change en

3° La musique *harmonique* ou *moderne*, caractérisée par l'importance que prend l'harmonie considérée en elle-même. Ses origines commencent au seizième siècle.

1. Musique homophone.

Chez tous les peuples, la musique a été originairement à une seule partie. Nous la trouvons encore à cet état chez les Chinois, les Hindous, les Arabes, les Turcs et les Grecs modernes, quoique ces peuples soient en possession d'un système musical très-perfectionné sur certains points. La musique de l'ancienne civilisation grecque, sauf peut-être quelques ornements, cadences ou intermèdes exécutés par les instruments, était absolument homophone; tout au plus les voix

(1) Dans les écrits de Kiesewetter, notamment, si riches d'ailleurs en faits historiques rassemblés avec le plus grand soin, il règne une tendance évidemment exagérée à nier tout ce qui ne rentre pas dans le schéma du mode majeur ou du mode mineur.

s'accompagnaient-elles à l'octave ; c'est ce qui peut aujourd'hui être considéré comme bien établi. Parmi les problèmes d'Aristote (1), se trouve la question suivante : « Pourquoi la consonnance d'octave est-« elle seule employée dans le chant ? Sur le magadis (instrument ana-« logue à la harpe) on exécute l'octave, mais aucune des autres con-« sonnances. » A un autre endroit, il remarque que les voix d'hommes et d'enfants, qui se répondent en chantant alternativement, forment entre elles l'intervalle d'une octave.

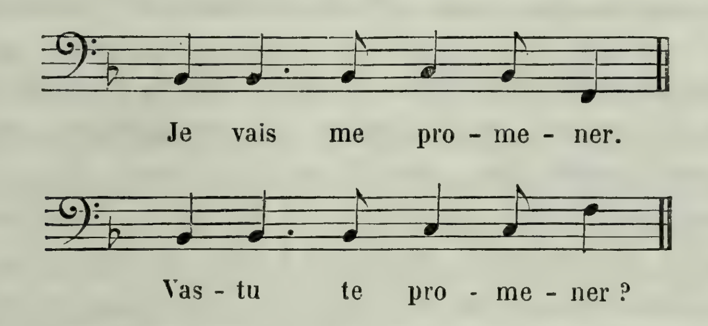
La musique homophone, considérée isolément, par elle-même, sans le secours de la poésie, était trop pauvre de formes, et présentait trop peu de variété pour pouvoir comporter un plus considérable et plus riche développement artistique. Aussi, dans cette période, la musique purement instrumentale était-elle nécessairement limitée à de petits morceaux de danse ou à des marches de peu d'étendue ; on ne trouve rien de plus, en réalité, chez les peuples qui n'ont point de musique harmonique. Des joueurs de flûte (2) ont, il est vrai, souvent remporté la victoire dans les jeux pythiens, mais leurs compositions devaient consister en morceaux de peu d'importance, comme, par exemple, des variations sur une courte mélodie. Le principe des variations (μεταβολή) d'une mélodie, au point de vue de l'expression dramatique (μίμησις), était d'ailleurs connu des Grecs ; c'est ce qui résulte encore des ouvrages d'Aristote (Probl. 15). Il décrit la chose très-clairement, et fait la remarque qu'il vaut mieux ne faire chanter aux chœurs que des mélodies simples, dans les antistrophes, parce que l'exécution des variations est plus facile à une seule voix qu'à plusieurs. Mais les acteurs et les virtuoses se disputant la victoire pouvaient exécuter des variations.

La musique homophone ne peut donner matière à des œuvres d'art plus développées qu'en associant le chant à la poésie, et c'est aussi de cette manière que l'antiquité classique s'est servie de la musique. Ce n'étaient pas seulement les odes et les hymnes religieux qui étaient chantés ; les tragédies elles-mêmes et les grands morceaux épiques étaient récités sur une sorte de chant musical, et accompagnés de la lyre. Nous pouvons difficilement aujourd'hui nous en faire une idée, parce que, suivant notre goût moderne, nous demandons, au contraire, à la bonne déclamation, ou à la lecture à haute voix, la vérité dramatique dans le ton ; nous considérons comme une très-grosse faute une récitation chantante. Dans la mélopée des déclamateurs italiens, et dans

(1) *Probl.* 19, 18 et 30. A la fin des airs de chant, l'accompagnement instrumental semble s'être quelquefois séparé de la voix. Il semble que c'est là ce qu'il faut entendre par le mot de *krusis* (κροῦσις ὑπὸ τὴν ᾠδήν). Voir Arist., *probl.* 19, 39, et Plutarque, *De musicâ*, XIX, XXVIII.

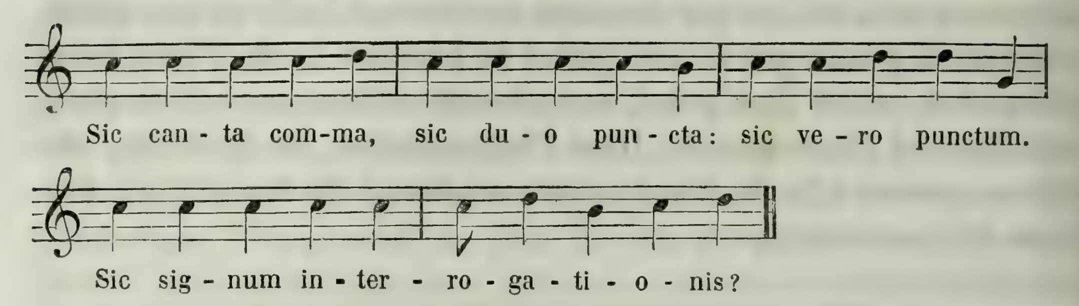
(2) Les αὐλοὶ se rapprochaient peut-être davantage de nos hautbois.

la récitation liturgique des prêtres catholiques romains, nous pouvons trouver des vestiges de la déclamation antique. Au reste, une observation un peu attentive fait bientôt reconnaître que, même dans le langage ordinaire, où la portion sonore de la voix est couverte en partie par les bruits qui caractérisent chaque lettre, où, de plus, la hauteur du son n'est pas fixée d'une manière précise, et varie fréquemment par transitions insensibles, il se rencontre certaines cadences involontaires formées suivant des intervalles musicaux réguliers. Quand on prononce des phrases simples, sans être sous l'empire d'un sentiment énergique, la voix se maintient le plus souvent à une hauteur moyenne; ce n'est que sur les mots accentués, à la fin ou aux subdivisions de la phrase que le son change de hauteur. La fin d'une phrase affirmative, suivie d'un point, se reconnaît ordinairement à ce que la voix descend d'une quarte. Dans l'interrogation, au contraire, elle s'élève souvent à la fin d'une quinte au-dessus du ton général. Une basse dit, par exemple :



Les mots accentués se distinguent en ce qu'ils sont d'environ un ton plus haut que les autres, et ainsi de suite. Dans la déclamation solennelle, les cadences de la voix sont plus variées et plus compliquées. Le récitatif moderne tire son origine de l'imitation de ces cadences, au moyen du chant. Jacob Péri, qui en est l'inventeur, s'explique là-dessus très-clairement dans la préface de son opéra d'*Eurydice*, paru en 1600. On cherchait alors à reproduire, au moyen du récitatif, la déclamation des tragédies antiques. La récitation différait de notre récitatif moderne, en ce qu'elle conservait plus exactement le rhythme des poésies, et en ce qu'elle n'était point accompagnée par des harmonies. Notre récitatif actuel, quand il est bien dit, peut cependant nous donner une idée de la puissance d'expression qu'ajoute aux mots une déclamation musicale de ce genre, bien mieux que ne peut le faire la récitation monotone de la liturgie romaine, quoique celle-ci se rapproche peut-être plus, par essence, de la mélopée antique que le récitatif d'opéra. L'établissement de la liturgie romaine, par le pape Grégoire le Grand (de 590 à 604), a eu lieu à une époque où des réminiscences de l'art ancien, quoique altérées et défigurées, pouvaient

encore avoir été conservées par la tradition, surtout si, comme il est vraisemblable de l'admettre, Grégoire n'a fait que fixer définitivement, dans leurs traits essentiels, les règles en usage dans les écoles de chant romain, établies depuis le temps du pape Sylvestre (de 314 à 335). La plupart de ces formules, pour les lectures, les collectes, etc., imitent nettement la cadence du langage ordinaire. Elles conservent la même hauteur qui change un peu sur certains mots accentués on non latins; on prescrit des formules de terminaison particulières, à chaque signe de ponctuation, par exemple, dans les lectures d'après les usages de Münster (1) :



Suivant la solennité de la fête, le sujet récité, le rang du prêtre récitant ou répondant, ces formules de terminaison, ou d'autres analogues, sont tantôt plus, tantôt moins ornées. On y reconnaît facilement une tendance à reproduire les inflexions naturelles du langage ordinaire, de manière pourtant à leur donner plus de solennité, en les débarrassant des irrégularités individuelles qu'elles peuvent présenter. Néanmoins, dans des formules invariables de cette nature, on ne s'occupe pas du sens grammatical de la phrase, qui, en réalité, modifie beaucoup l'intonation. On peut supposer que c'est de la même manière, que les poëtes tragiques de l'antiquité indiquaient aux acteurs les intonations sur lesquelles ils devaient parler, et que ceux-ci s'y maintenaient au moyen d'un accompagnement musical. Et, comme la tragédie antique se tenait beaucoup plus loin que le théâtre moderne de la vérité extérieure, immédiate, du *naturel*, ainsi que le montrent les rhythmes de la poésie, l'accentuation insolite des mots, l'étrangeté et l'immobilité des masques, le ton de la déclamation pouvait aussi être plus chantant que ne le tolérerait peut-être notre oreille avec ses habitudes modernes. Nous devons alors supposer que, par l'accentuation (augmentation d'intensité sonore) des mots isolés, par la lenteur ou la rapidité de l'élocution, par la pantomime, on pouvait encore animer beaucoup ce système de déclamation, dont la monotonie aurait été insupportable, si l'acteur n'avait su la vivifier par des procédés de ce genre.

(1) Antony, *Méthode de chant grégorien*. Münster, 1829.

En tout cas cependant, bien que, dans l'antiquité, la musique homophone ait à accompagner des poésies de l'ordre le plus élevé, d'une importance considérable, elle joue toujours nécessairement un rôle tout à fait secondaire. Les mouvements de la mélodie devaient suivre de très-près le sens variable des mots, et la musique, à elle seule, ne pouvait avoir aucun lien, aucune valeur artistique. Il eût été intolérable de chanter sur une mélodie donnée, continue, les hexamètres des poëmes épiques, ou les trimètres ïambiques des tragédies. Au contraire, les mélodies (Neumes) qu'on mettait sous les odes et les chœurs tragiques comportaient plus de liberté et de spontanéité. Pour les odes, il y avait aussi des mélodies connues dont les dénominations ont été en partie conservées, et sur lesquelles on faisait toujours de nouvelles poésies.

Ainsi, dans les œuvres d'art d'une grande étendue, la musique devait abdiquer toute valeur propre; à elle seule, elle ne pouvait former que de courtes phrases. C'est là un caractère tout à fait essentiel du développement du système de musique homophone. Nous trouvons généralement, chez les nations qui sont en possession de ce genre de musique, certains systèmes d'échelons de hauteur invariable dans lesquels se meuvent les mélodies. Ces échelles ou gammes sont très-nombreuses, et, en apparence, très-arbitraires par parties; aussi beaucoup d'entre elles paraissent-elles tout à fait étranges et incompréhensibles, tandis que, chez les peuples les mieux doués, chez les Grecs, les Arabes et les Hindous, elles ont été l'objet d'une culture extraordinairement subtile et compliquée.

Au point de vue qui nous préoccupe ici, la description de ces systèmes musicaux nous conduit à poser la question, très-importante, de savoir si, dans tous, il existe un rapport déterminé entre tous les sons de la gamme, reposant sur leurs liens respectifs avec un même son fondamental et principal, la *tonique*. La musique moderne établit une liaison intime, purement musicale, entre tous les sons d'une phrase, en établissant entre eux et une certaine tonique, un rapport d'affinité aussi net que possible pour l'oreille. Nous pouvons, avec Fétis, désigner sous le nom de *principe de la tonalité*, cette domination de la tonique formant comme le lien de tous les sons de la phrase. Ce savant musicien remarque avec raison que la tonalité s'est développée à des degrés très-divers, et suivant des voies différentes, dans les mélodies des diverses nations. Ainsi, notamment, dans les airs populaires des Grecs modernes, dans les formes vocales de l'Église grecque, et dans le chant grégorien de l'Église catholique romaine, la tonalité ne s'est pas développée de manière à permettre facilement d'harmoniser ces mélodies, tandis que Fétis (1) trouve en général que les anciens airs des peuples

(1) Fétis, *Biographie universelle des Musiciens*, t. I, p. 126.

d'origine germanique, celtique ou slave, se prêtent volontiers à recevoir un accompagnement harmonique.

Par le fait, il est surprenant que, dans les écrits des Grecs sur la musique, où ils traitent souvent et longuement de subtilités, et donnent les détails les plus précis sur toutes les autres propriétés possibles des gammes, on ne trouve rien de bien clair sur un point qui domine tous les autres dans le système moderne, et qui se fait sentir partout de la manière la plus nette. Les seules allusions à l'existence d'une tonique ne se trouvent point dans les écrivains musicaux, mais seulement dans Aristote (1). Il dit, en effet : « Quand on change le son central (μέση), après avoir accordé les autres cordes, et qu'on joue de l'instrument, pourquoi tout sonne-t-il mal, tout paraît-il faux, non-seulement quand on arrive au son central, mais même dans toutes les autres régions de la mélodie ? Si, au contraire, on ne change que les *Lichanos* ou tout autre son, la différence qui se produit ne se fait sentir que sur ces notes. N'y a-t-il pas une bonne raison pour cela? Car dans tous les airs bien faits le *Mese* (son central) revient souvent; tous les bons compositeurs emploient souvent le *Mese*, et, quand ils le quittent, ils y reviennent bientôt, ce qui n'a lieu au même degré pour aucun autre son. » Puis il compare encore le *Mese* aux conjonctions du langage, surtout à celles qui signifient *et*, et sans lesquelles le langage ne serait pas possible. « Il en est de même du *Mese* qui est, pour ainsi dire, le lien des sons, et surtout des beaux, parce que c'est lui qui revient le plus souvent. » A un autre endroit, nous retrouvons la même question avec une réponse différente : « Pourquoi, lorsqu'on modifie le *Mese*, toutes les autres cordes semblent-elles comme faussées ? Lorsqu'au contraire, le *Mese* restant le même, on altère le son d'une autre corde, celle-ci seule paraît faussée. Cela vient-il de ce que la justesse de toutes les cordes n'est autre chose qu'une certaine relation avec le *Mese*, qui donne le rang de chaque corde dans le tout ? Si l'on supprime ce qui sert de base à la justesse, ce qui sert de lien général, l'ordre ne paraît plus exister au même degré dans l'ensemble. » Dans ces passages, le rôle esthétique d'une tonique, appelée ici le *Mese*, est décrit aussi bien qu'il peut l'être. Ajoutons à cela que les Pythagoriciens comparaient le son central ou *Mese* au soleil, les autres sons aux planètes (2). Il paraît aussi que les chants commençaient, en général, par ce son central ; car, dans le trente-troisième problème, Aristote demande : « Pourquoi est-il plus harmo-

(1) *Problemata* 20 et 36. Au début de ce passage, on a remplacé, d'après une conjecture de mon collègue Stark, les mots φθεγγόμεναι et φθέγγεται, qui n'offrent aucun sens, par φθείρομεναι et φθείρεται.

(2) Nicomachus, *Harmonice*, lib. I, p. 6 ; edit. Meibomii.

« nieux d'aller de l'aigu au grave que de suivre la marche inverse? « Peut-être parce que, dans le premier cas, on commence par le vrai « commencement? Car le son central forme le guide supérieur du « tétrachorde inférieur. Dans la marche inverse, au contraire, on « commence, non par le commencement, mais par la fin. Ou peut- « être parce que le grave après l'aigu est plus noble et sonne mieux? » Il paraît résulter de là que, si on débutait par le son central, on terminait, au contraire, par le son le plus grave, l'Hypate. Aristote dit encore, dans le quatrième problème, qu'à l'opposé de son voisin immédiat, le Parhypate, l'Hypate se chante sans aucun des efforts d'attention que demandent les autres notes. La gamme à laquelle Aristote fait ici allusion est la gamme à huit sons de Pythagore, et peut être notée de la manière suivante :

Tétrachorde inférieur.	*mi*,	Hypate.
	fa,	Parhypate.
	sol,	Lichanos.
	la,	Mese (son central).
Tétrachorde supérieur.	*si*,	Paramese.
	ut,	Trite.
	ré,	Paranete.
	mi,	Nete.

Suivant l'expression moderne, il résulte de la description précitée d'Aristote que le Parhypate forme avec l'Hypate, une sorte de sensible descendante. Quand on chante la sensible, on sent un effort qui disparaît au moment où on arrive sur le son fondamental.

Si donc le son central correspond à la tonique, l'Hypate en est la quinte, la dominante. Mais pour notre sentiment actuel, il est beaucoup plus nécessaire de terminer que de commencer par la tonique; aussi, considérons-nous ordinairement, *àpriori*, le dernier son d'une phrase comme la tonique. Cependant, en règle générale, la musique moderne fait entendre la tonique sur le premier temps fort du commencement. Tout l'ensemble sonore part donc de la tonique pour y revenir. La terminaison ne peut donner pleine satisfaction à notre oreille, que si la série des sons aboutit au centre commun qui forme le lien général de toute la phrase.

L'ancienne musique grecque semble donc différer de la nôtre, en ce que la terminaison se faisait sur la dominante et non sur la tonique. Au reste, l'analogie était ainsi plus complète avec l'intonation du langage parlé. Nous avons vu que la terminaison d'une phrase affirmative se fait précisément sur la quinte inférieure du son général. Cette particularité a été aussi, le plus souvent, observée dans le réci-

tatif moderne; la phrase de chant s'y termine ordinairement sur la dominante, accompagnée de l'accord de septième de dominante donné par les instruments, immédiatement après lequel vient l'accord de tonique, pour former la terminaison sur la tonique que réclame impérieusement notre sentiment musical. Comme la musique grecque a pris naissance dans la récitation d'hexamètres épiques et de trimètres ïambiques, nous ne devons pas être étonnés si les particularités précitées du langage parlé jouent encore le principal rôle, même dans les mélodies, à tel point qu'Aristote pouvait les considérer comme formant la règle (1).

Il résulte des faits que nous venons de citer, et c'est là ce qui présente un intérêt particulier pour l'objet de nos recherches, que les Grecs, chez lesquels notre gamme diatonique a pris naissance, n'étaient pas absolument dépourvus du sentiment de la tonalité au point de vue esthétique; seulement, ce sentiment n'était pas encore aussi nettement prononcé que dans la musique moderne, et surtout, à ce qu'il semble, il ne jouait aucun rôle bien caractérisé dans les règles techniques de la construction mélodique. Aussi Aristote, qui s'occupe de musique comme esthéticien, est-il le seul écrivain connu jusqu'ici, qui dise quelques mots de la question; les auteurs spéciaux gardent un silence absolu à cet égard. Malheureusement les indications d'Aristote sont encore si vagues, qu'elles laissent encore subsister un assez grand nombre de doutes. Il ne dit rien notamment des différences des diverses gammes, au point de vue du son fondamental, en sorte que c'est précisément le point le plus important sous lequel nous ayons à considérer la construction des gammes grecques, qui reste presque entièrement dans l'ombre.

On trouve ce rapport avec une tonique, déterminé d'une manière plus précise dans les modes de l'ancien plain-chant chrétien. On distinguait dans l'origine les quatre gammes dites *authentiques*, telles qu'elles avaient été établies par l'évêque Ambroise de Milan (398).

Aucune d'elles ne concorde avec une de nos gammes actuelles; les quatre séries plagales, ajoutées plus tard par Grégoire, ne sont pas des gammes, dans le sens que nous attachons à ce mot. Les quatre gammes authentiques d'Ambroise sont les suivantes :

1° *ré, mi, fa, sol, la, si, ut, ré,*
2° *mi, fa, sol, la, si, ut, ré, mi,*
3° *fa, sol, la, si, ut, ré, mi, fa,*
4° *sol, la, si, ut, ré, mi, fa, sol.*

(1) Parmi les prétendues mélodies antiques qui sont parvenues jusqu'à nous, le fragment publié par Marcello, de l'ode homérique, accuse très-nettement les particularités dont il s'agit.

Néanmoins, le changement du *si* en *si* ♭ fut peut-être permis dès le commencement; ce qui rendait la première gamme identique à nos gammes mineures descendantes, et la troisième identique à la gamme de *fa* majeur. L'ancienne règle voulait que les mélodies, écrites dans la première, la seconde, la troisième, la quatrième gamme se terminassent respectivement en *ré*, *mi*, *fa*, *sol*. Ces notes jouaient donc le rôle de toniques, dans le sens que nous donnons aujourd'hui à ce mot. Mais la règle n'était pas exactement observée. On pouvait aussi finir sur d'autres sons, auxquels on donnait le nom de *notes confinales*, et, en définitive, le chaos devint si grand que personne ne pouvait plus dire exactement à quoi on reconnaissait le ton; des règles de toute sorte mais insuffisantes, furent proposées, et enfin on eut recours à un moyen mécanique : on prescrivit de commencer et de finir les morceaux par certaines phrases de forme invariable, appelées *tropes*, qui devaient caractériser chacune des tonalités.

Par conséquent, bien que, dans ces modes du plain-chant du moyen âge, la règle de la tonalité eût déjà attiré l'attention, cette règle même était encore si incertaine, et admettait tant d'exceptions, que, sans aucun doute possible, le sentiment de la tonalité était beaucoup moins développé à cette époque que dans la musique moderne.

Au reste, les Hindous, dont la musique est aussi homophone, se sont aussi élevés à l'idée de tonique. Ils lui donnent le nom d'*Ansa* (1).

Les mélodies hindoues, à en croire les descriptions des voyageurs anglais, paraissent d'ailleurs très-analogues aux mélodies européennes modernes. Fétis et Coussemaker (2) ont fait la même remarque à propos du petit nombre d'anciens airs germaniques ou celtiques parvenus jusqu'à nous.

Par conséquent, quoique le sentiment de la prépondérance d'un seul son formant tonique ne fût pas absolument inconnu à la musique homophone, il était, sans contestation possible, beaucoup moins développé que dans la musique moderne, où un petit nombre d'accords consécutifs suffisent pour déterminer dans quel ton se meut la portion considérée du morceau. Il faut, à mon avis, en chercher la raison dans la situation inférieure et dans le rôle secondaire, qui s'imposaient nécessairement à la musique homophone.

Des mélodies, qui ne comprennent qu'un petit nombre de sons facilement reconnaissables, déjà reliés entre eux par un lien non musical, les mots de la poésie, ne demandent point à la musique un

(1) Jones, *Sur la Musique des Hindous;* traduction allemande par Dalberg, p. 36 et 37.
(2) *Histoire de l'Harmonie au moyen âge*. Paris, 1852.

système d'enchaînement logique. Dans le récitatif moderne lui-même, la tonalité est déterminée avec beaucoup moins de précision que dans les morceaux de forme différente. La nécessité d'établir entre les sons une dépendance invariable fondée sur des considérations purement musicales, a dû s'imposer plus clairement au sentiment artistique, lorsqu'il s'est agi de réunir dans une œuvre d'art de grandes masses de sons, devant avoir une signification propre sans le secours de la poésie.

2. Musique polyphone.

La seconde période du développement de la musique est formée par la musique polyphone du moyen âge. Le premier essai de musique polyphone, qu'on appliqua au chant d'Église, fut l'*organum* ou la *diaphonie*, telle qu'on la trouve décrite pour la première fois dans Hucbald, moine flamand, au commencement du dixième siècle. On cherchait à faire accompagner la mélodie sacrée par une seconde voix formant avec la première, non plus seulement un intervalle d'octave, comme chez les Grecs, mais aussi d'autres intervalles consonnants, c'est-à-dire ceux de quinte, de quarte, de douzième ou de onzième; car les tierces et les sixtes étaient encore rangées parmi les dissonnances. Le but qu'on se proposait évidemment ainsi était d'ajouter à la beauté du chant, au moyen du charme particulier aux intervalles consonnants. Un semblable accompagnement, toujours à la quinte ou à la quarte, est très-désagréable pour notre oreille. Au reste Hucbald employait aussi, quoiqu'exceptionnellement, un autre système d'accompagnement, dans lequel les intervalles variaient, et qui convient mieux à notre goût actuel. Guy d'Arezzo, qui au moyen âge passait pour une autorité en matière de plain-chant, et qui vivait au onzième siècle, n'était pas encore beaucoup plus avancé qu'Hucbald dans l'art de la diaphonie; néanmoins on trouve plus fréquemment dans ses ouvrages des exemples de diaphonie à intervalles variables. Depuis cette époque, l'emploi des suites de quintes et de quartes se restreignit toujours de plus en plus, les voix durent principalement procéder par mouvements contraires; néanmoins, pendant longtemps encore, les quartes, les quintes et les octaves formèrent les principaux intervalles de l'harmonie.

Un autre genre de musique polyphone, le *déchant*, exerça une influence plus grande sur le développement de la musique; il était connu en France et en Flandre vers la fin du onzième siècle. Dans les plus anciens exemples qui nous soient parvenus, ce déchant consiste à prendre deux airs complétement différents — on paraissait même les choisir de préférence aussi différents que possible, — et à les alterner

l'un à l'autre par de petites modifications de rhythme ou de hauteur, jusqu'à ce que, exécutés simultanément, ils forment un ensemble consonnant dans une certaine mesure. Dans l'origine, on paraît notamment avoir associé volontiers une formule liturgique avec une chansonnette légère quelconque. Les premiers exemples de ce genre de musique, peuvent ne pas avoir eu d'autre signification que celle de petits morceaux de musique, destinés à servir de divertissements de société. C'était une nouvelle découverte qui amusait, que de voir deux airs tout à fait différents, indépendants l'un de l'autre, qui pouvaient être chantés ensemble, en produisant sur l'oreille un effet agréable.

La diaphonie accentuait le principe des sons simultanés ; elle tentait de faire servir l'harmonie des consonnances à obtenir un plus bel effet musical ; la partie d'accompagnement n'avait aucune valeur par elle-même. Mais cette époque n'était pas encore de force à développer ce principe de l'harmonie, d'autant plus que les modes du plain-chant, parmi lesquels notre gamme majeure ne figurait qu'à titre de licence, devaient rendre le problème beaucoup plus compliqué qu'il ne l'aurait été avec les gammes modernes. La construction d'un système d'harmonie demandait encore une longue série de tâtonnements, d'expériences artistiques ; on n'y parvint que beaucoup plus tard.

Le principe du déchant, au contraire, se prêtait par nature aux développements que cette époque était en mesure de fournir, et c'est de là que la musique polyphone proprement dite tire son origine. Différentes parties ayant chacune une valeur par elle-même, jouant chacune une mélodie distincte, devaient être associées de manière à ne produire, dans leur exécution simultanée, aucune cacophonie, ou, du moins, à n'admettre que des discordances passagères, immédiatement résolues. Il ne s'agissait pas d'arriver à la consonnance ; le but proposé était seulement d'éviter l'effet opposé, la dissonnance. Tout l'intérêt se concentrait sur le mouvement des parties. Pour maintenir ensemble les différentes voix, il était nécessaire d'observer exactement la mesure ; aussi est-ce sous l'influence du déchant, que prirent naissance les nombreux et riches développements du système de rhythme musical, qui, à son tour, contribue à donner au mouvement mélodique plus de force et plus d'action. Le *Cantus firmus* grégorien ne connaissait aucune division de mesure, et la rhythmique de la musique de danse était extraordinairement simple. En outre, la richesse et l'intérêt du mouvement mélodique s'accrurent dans une proportion telle, que les parties se compliquèrent, et, bientôt, on découvrit encore un nouveau moyen d'établir une dépendance artistique entre les différentes parties, moyen qui, comme nous l'avons vu, faisait

complétement défaut dans l'origine. On fit répéter par une autre partie la phrase musicale exécutée par la première; ainsi prirent naissance les imitations dites en *canon*, que nous trouvons déjà dans les déchants à partir du douzième siècle (1). Ces formes finirent peu à peu par constituer un système très-développé, surtout chez les compositeurs néerlandais, qui en vinrent à mettre souvent plus de calcul que de goût dans leurs œuvres.

Ainsi ce genre de musique polyphone, c'est-à-dire la répétition des mêmes dessins mélodiques par les différentes parties entrant successivement en scène, donnait maintenant pour la première fois la possibilité de composer des phrases musicales développées, qui trouvaient leur lien artistique commun, non plus dans l'association de la musique à un autre art, la poésie, mais dans un élément purement musical.

Ce genre de musique convenait aussi, à un haut degré, aux chants d'Église, où le chœur avait à exprimer les sentiments de toute une assemblée composée d'individus différents. On appliqua néanmoins ce système, non-seulement aux morceaux religieux, mais aussi à la musique profane, aux romances, aux madrigaux. On ne connaissait pas encore de formes de musique harmonique, autres que celles fondées sur les répétitions en canon, qui fussent parvenues à un certain degré de développement artistique. Si on refusait d'y avoir recours, on était condamné à la musique homophone. Par suite, on trouve une quantité d'airs écrits en forme de canons classiques ou d'imitations, et dont les paroles n'étaient guère appropriées à une allure aussi lourde. Aussi, les plus anciens exemples de musique instrumentale à plusieurs parties, les airs de danse, à partir de l'année 1529 (2), sont-ils écrits dans le style des madrigaux et des motets. Même dans les premiers essais de musique dramatique, au seizième siècle, on ne connaissait pas encore d'autre moyen pour faire exprimer aux différents personnages les sentiments qui les animaient, que de faire chanter par un chœur, sur la scène ou dans la coulisse, des madrigaux en style fugué. Au point où nous en sommes maintenant, on peut à peine se faire une idée de cet état de l'art où on savait, dans les chœurs, donner aux voix les mouvements les plus compliqués, et où on n'était pas capable de mettre à une mélodie populaire, à un duo, un accompagnement simple, pour compléter l'harmonie. Quand on lit les éloges et l'admiration accordés à l'invention du récitatif avec accompagnement d'accords simples, découvert par Jacob Péri, les discussions

(1) Coussemaker, *loc. cit.* — Déchant, *Custodi nos*, pl. XXVII, nº 4.
(2) Winterfeld, *Johannes Gabrieli et son temps*, vol. II, p. 41.

qui se sont élevées pour revendiquer la gloire de cette découverte, la sensation provoquée par Viadana, lorsqu'il trouva le moyen d'ajouter à des chants à une ou deux parties, une *Basse continue,* partie n'ayant point une valeur par elle-même et ne servant qu'à l'harmonie (1), on ne peut douter que l'art d'accompagner une mélodie, problème des plus simples aujourd'hui pour tout dilettante, ne fût encore complétement inabordable pour les musiciens jusqu'à la fin du seizième siècle. C'est à cette époque qu'on commença à avoir conscience du rôle que jouent les accords, comme parties intégrantes du tissu harmonique, indépendamment de la conduite des parties.

A cet état de l'art correspondait un état particulier du système des gammes. Les anciens modes du plain-chant étaient conservés dans leurs parties essentielles ; le premier allait de $ré_0$ à $ré_1$, le second, de mi_0 à mi_1, le troisième, de fa_0 à fa_1, le quatrième de sol_0 à sol_1. Parmi eux , le troisième de fa_0 en fa_1 était inapplicable au travail harmonique, parce qu'au lieu de la quarte $fa_0 — si_0\flat$, il contenait le *triton* $fa_0 — si_0$. D'un autre côté, il n'y avait aucune raison d'exclure les séries d'ut_0 en ut_1 et de la_0 en la_1. Les modes du plain-chant se modifièrent sous l'influence de la musique polyphone. Seulement, comme, malgré ces modifications, les anciens noms furent conservés quoique ne s'appliquant plus, il se produisit une épouvantable confusion dans le système des gammes. Vers la fin de cette période, un savant théoricien, Glaréanus, dans son *Dodécachordon* (Bâle, 1547), entreprit de remettre de l'ordre dans la théorie des gammes. Il en distinguait douze, savoir : six authentiques et six plagales, et leur distribua des noms grecs, mais qui étaient mal appliqués. Néanmoins, c'est sa nomenclature des modes du plain-chant qui prévalut et se généralisa ; les modes authentiques de Glaréanus, avec leurs noms grecs, sont les suivants :

Ionien	:	*ut, ré, mi, fa, sol, la, si, ut,*
Dorien	:	*ré, mi, fa, sol, la, si, ut, ré,*
Phrygien	:	*mi, fa, sol, la, si, ut, ré, mi,*
Lydien	:	*fa, sol, la, si, ut, ré, mi, fa,*
Mixolydien	:	*sol, la, si, ut, ré, mi, fa, sol,*
Éolien	:	*la, si, ut, ré, mi, fa, sol, la.*

Le mode ionien correspond à notre gamme majeure, l'éolien à notre gamme mineure ; le mode lydien était à peine employé dans la musique polyphone, à cause de la fausse quarte, et toujours avec toute sorte de modifications.

On savait si peu apprécier le rôle musical de l'harmonie, on le voit

(1) Winterfeld, *loc. cit.*, vol. II, p. 19 et 59.

par la théorie des gammes, que, dans la détermination du ton d'un morceau polyphonique, on ne prenait jamais en considération que des parties isolées. Dans certains morceaux, Glaréanus écrit les différentes parties, de ténor et de basse, de soprano et d'alto, dans des modes différents ; Zarlino prend le ténor comme partie principale, qui détermine le mode dans lequel la pièce est écrite.

Les conséquences pratiques de cette absence de considérations harmoniques se révèlent souvent dans les morceaux. On se limitait en somme aux sons de la gamme diatonique ; les signes d'altération (dièses, bémols, bécarres) étaient peu employés. Le changement du *si* en *si* ♭ avait déjà été pratiqué chez les Grecs dans un tétrachorde particulier, celui des *Synemmenoi*, et fut maintenu. En outre, on mettait quelquefois un ♯ devant le *fa*, l'*ut* et le *sol*, pour avoir des sensibles dans les cadences. Par conséquent, la modulation, dans le sens que nous attachons à ce mot, c'est-à-dire le passage d'une tonalité à une autre caractérisée par une autre armure, faisait presque complétement défaut à la musique polyphone. De plus, jusqu'à la fin du quinzième siècle, on donna la préférence aux accords formés d'octaves et de quintes, sans tierces, dont l'harmonie nous paraît vide, et que nous cherchons aujourd'hui à éviter. Ces accords étaient considérés comme les plus harmonieux par les compositeurs du moyen âge, parce qu'ils n'étaient préoccupés que d'avoir des consonnances aussi parfaites que possible ; dans les cadences finales, notamment, on n'admettait que des accords de ce genre. Les dissonnances ne figuraient en général que comme retards ou notes de passage ; on ne connaissait pas les accords de septième qui jouent un si grand rôle dans la musique moderne, pour la désignation de la tonalité, pour la liaison et la rapidité des mouvements de l'harmonie.

Par conséquent, quelque grandes que soient les conquêtes réalisées par cette période dans le domaine du rhythme et de l'art de conduire les parties, au point de vue de l'harmonie et du système de gammes, elle n'a guère fait que rassembler une foule de résultats d'expériences qu'elle a laissés encore sans ordre. Comme la marche compliquée des parties donnait forcément naissance à des accords très-variés et se succédant de diverses manières, les musiciens de cette époque ne pouvaient s'empêcher d'apprendre à entendre ces accords, à apprécier leur action, malgré le peu d'aptitude qu'ils avaient encore à en utiliser les propriétés. En tout cas, les expériences de cette période préparaient le développement de la musique harmonique proprement dite, et donnaient aux musiciens la possibilité de réaliser ce développement, lorsque des nécessités extérieures viendraient le réclamer.

3. Musique harmonique.

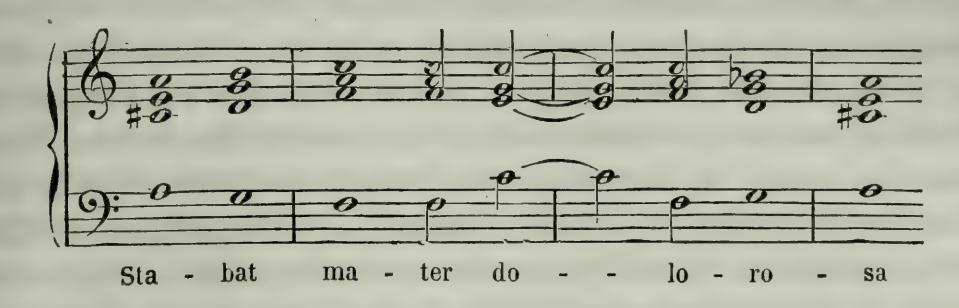
Ce qui caractérise la musique harmonique moderne, c'est que l'harmonie prend une importance, une valeur propre pour l'expression et la cohésion artistique des morceaux. Elle est donc revenue au principe qu'on avait cherché à développer, sans pouvoir y réussir, dans l'ancienne diaphonie d'Hucbald et de Franco de Cologne. Des causes extérieures de plusieurs natures poussaient à cette transformation de la musique. Au premier rang, il faut ranger les exigences des chants du culte protestant. Il rentrait dans le principe du protestantisme que l'assemblée des fidèles dût elle-même exécuter les airs religieux ; or, on ne pouvait songer à lui faire exécuter, dans toute leur complication, les difficultés rhythmiques de la polyphonie néerlandaise. D'un autre côté, les chefs de la nouvelle confession, Luther à leur tête, étaient trop pénétrés de la puissance et de l'importance de la musique, pour vouloir la ramener à la simplicité trop nue du chant homophone. Il en résulta, pour les compositeurs protestants, la nécessité d'écrire des *chorals* harmonisés avec simplicité, où toutes les voix se mouvaient simultanément. Or, jusque-là, les imitations en canon des mêmes phrases mélodiques étaient réparties entre les différentes voix, et ce sont elles qui avaient principalement assuré à l'ensemble un cachet d'unité. Il fallait donc chercher dans les sons eux-mêmes un nouveau principe d'affinité, et on le trouva dans une relation plus étroite avec une tonique prépondérante. La solution du problème fut facilitée par ce fait que, les chants sacrés protestants furent en grande partie adaptés à des airs populaires déjà connus, et, comme on l'a déjà remarqué plus haut, les mélodies populaires d'origine germanique ou celtique, trahissaient un sentiment plus accentué de la tonalité telle que nous l'entendons, que la musique des peuples du Midi. Aussi, dans les chants sacrés protestants du seizième siècle, le système d'harmonie du mode ionique, de notre gamme majeure, est-il déjà développé d'une manière assez correcte, à tel point que, même aujourd'hui, nous ne trouvons dans ces *chorals* rien qui choque notre sentiment musical, bien qu'un grand nombre de découvertes ultérieures destinées à désigner plus clairement la tonique, comme par exemple, les accords de septième, y fassent encore défaut. En revanche, il s'écoula beaucoup plus de temps avant que les autres modes du plain-chant, dont l'harmonie était beaucoup plus incertaine, se fondissent dans notre gamme mineure. A cette époque, la musique sacrée des protestants agit énergiquement sur les âmes des contemporains; cette action est attestée partout dans les termes les plus cha-

leureux, en sorte qu'on ne peut douter que l'impression produite par cette musique n'ait été, par elle-même, quelque chose de tout à fait nouveau, d'une puissance particulière.

Dans l'Église catholique romaine aussi, on réclamait une réforme du chant religieux. Les errements de l'art polyphone détruisaient le sens des mots, les rendaient inintelligibles, et il était difficile à un auditeur non exercé, souvent même à un auditeur instruit et habitué, de débrouiller le chaos des parties. A la suite des délibérations du concile de Trente, et sur l'ordre du pape Pie IV, Palestrina accomplit cette simplification et cette réforme du chant religieux ; par la beauté simple de ses œuvres, on dit qu'il a empêché le chant à plusieurs parties de disparaître complétement de la liturgie romaine. Palestrina, qui écrivait pour des choristes exercés, ne renonça pas entièrement aux combinaisons vocales compliquées de la musique polyphone, mais, par des repos, par une distribution convenablement choisie, il sut coordonner aussi bien l'ensemble des sons que celui des voix, qui sont souvent réparties entre plusieurs chœurs distincts. Assez souvent aussi, les voix chantent en chœur, les unes à côté des autres, en formant surtout alors des accords consonnants. Il rendit ainsi ses phrases plus claires, plus intelligibles, et, en général, extraordinairement harmonieuses. Mais, la différence entre les modes du plain-chant et les gammes modernes appropriées au travail harmonique, n'apparaît nulle part d'une manière aussi frappante que dans Palestrina et dans les compositeurs italiens de son temps, parmi lesquels il faut encore citer surtout le Vénitien J. Gabrieli. Palestrina était élève de Claude Goudimel, un huguenot tué à Lyon, à la Saint-Barthélemy, qui avait harmonisé les psaumes français ; ces morceaux ne s'écartent pas beaucoup des procédés harmoniques modernes, surtout ceux écrits en majeur. Les airs de ces psaumes étaient tirés, ou au moins imités de mélodies populaires. Par conséquent, Palestrina connaissait, par son maître, ce système de composition ; mais il avait affaire à des thèmes tirés du *Cantus firmus* grégorien, écrits dans les modes du plain-chant, et dont le caractère devait rester invariable, même dans les phrases qu'il inventait ou modifiait lui-même. Ces modes réclamaient un système d'harmonie tout autre, qui nous semble très-étrange. A l'appui de cette assertion, je vais me borner à citer ici le début du *Stabat mater* à huit voix.

Nous trouvons ici au début d'un morceau, c'est-à-dire à l'endroit où nous demanderions une indication précise de la tonalité, une série d'accords empruntés aux différents tons de *la* majeur à *fa* majeur, se succédant les uns aux autres sans raison apparente, contrairement à

toutes nos règles de modulation. Et comment pourrait-on, sans connaître le plain-chant, déterminer, d'après ce commencement, quelle est la tonique de ce morceau ? C'est le *ré* qui paraît jouer ce rôle à la



fin de la première strophe ; la tonique *ré* explique aussi le changement d'*ut* en *ut*♯ dans les premiers accords, et la mélodie principale, exécutée par le ténor, permet de reconnaître le *ré* pour tonique au commencement. Seulement, au huitième temps de la phrase, apparaît un accord de *ré* mineur, qu'un compositeur moderne aurait dû placer sur le premier temps fort de la première mesure.

Cet exemple montre très-nettement, dans ses traits caractéristiques, la différence essentielle qui existait entre tout le système du plain-chant et nos gammes modernes, car nous pouvons admettre comme certain, pour des maîtres comme Palestrina, que leur manière d'harmoniser reposait sur un sentiment juste de l'essence propre de chaque mode, et ne doit pas être attribuée au caprice ou à l'ignorance, d'autant que les progrès réalisés à la même époque dans les chants sacrés du protestantisme ne pouvaient leur être inconnus.

Ce qui nous choque dans les exemples analogues à celui qui vient d'être rappelé, c'est en premier lieu que l'accord de tonique ne joue pas, dès le début, le rôle prépondérant qui lui est attribué dans la musique moderne. Dans cette dernière, l'accord tonique a, par rapport aux autres, exactement la même importance, le même caractère de prépondérance, que la tonique par rapport aux autres sons de la gamme. En second lieu, nous regrettons surtout l'absence du sentiment d'affinité entre les accords consécutifs, d'après lequel la musique ne peut régulièrement faire succéder un accord à un autre qu'autant qu'ils ont une note commune servant de trait d'union. Cela tient évidemment à ce que, comme nous le verrons plus tard, dans les anciens modes du plain-chant on ne peut former des suites d'accords aussi étroitement reliés les uns avec les autres et avec l'accord de tonique, que dans nos gammes majeures et mineures.

Par conséquent, si même chez Palestrina et Gabrieli, on peut reconnaître déjà un sentiment artistique de l'effet harmonique des différents accords, effet indépendant du mouvement mélodique des diffé-

rentes voix, les règles inventées plus tard et qui devaient assurer aux suites d'accords une cohésion musicale tirée des propriétés mêmes de ces accords, n'étaient pas encore observées. La solution de ce problème exigeait le sacrifice des modes employés jusque-là, et leur transformation en nos gammes majeures et mineures. Mais, d'un autre côté, ce sacrifice fit perdre la plus grande partie des nombreuses variétés d'expression qui résidaient dans la diversité des modes. Parmi les anciens modes, les uns forment des transitions entre le mode majeur et le mode mineur ; les autres, comme le mode phrygien (de Glaréanus), exagèrent encore le caractère du mode mineur. Cette variété disparut et devait être remplacée par un nouveau procédé, savoir la transposition des gammes et les modulations d'un ton à un autre.

Cette évolution s'accomplit dans le cours du dix-septième siècle. Mais ce qui donna la plus vive impulsion au développement de la musique harmonique, ce furent les commencements de l'opéra, qui tire son origine d'une connaissance plus approfondie de l'antiquité classique, et dans lequel on cherchait précisément à reproduire les tragédies antiques qu'on savait avoir été récitées en musique. Le problème qui s'imposait ici immédiatement au compositeur, consistait à faire exécuter, par une ou plusieurs voix isolées, des phrases musicales qui devaient être harmonisées de manière à pouvoir figurer au milieu de chœurs travaillés dans le genre polyphonique, et où les parties vocales devaient se détacher de toutes les autres, les parties d'accompagnement devant leur être entièrement subordonnées. C'est ce qui fut réalisé par l'invention du récitatif, imaginé par J. Peri et Caccini, vers 1660, ainsi que par celle de l'air d'opéra, due à Cl. Monteverde et Viadana. La nouvelle manière d'envisager l'harmonie se manifeste dans la notation, par l'apparition de la *basse chiffrée* dans les œuvres de ces auteurs. Chaque note chiffrée de la basse représente un accord, et c'est ainsi que sont désignés les accords, tandis que l'agencement des parties qui les composent reste abandonné au goût de l'exécutant. Ce qui était l'accessoire dans la musique polyphone devient ici le principal, et réciproquement.

L'opéra rendait aussi nécessaire de rechercher des moyens d'expression d'une énergie plus grande, que ceux admis par la musique d'église. C'est dans Monteverde, esprit extraordinairement fécond en inventions nouvelles, que nous trouvons pour la première fois les accords de septième franchement abordés, ce dont il fut vivement blâmé par son contemporain Artusi. Bientôt on arriva rapidement à plus de hardiesse dans l'usage des dissonnances employées avec leur valeur propre, pour accentuer davantage les nuances de l'expression, et non plus comme des accidents fortuits du mouvement des parties.

C'est sous ces influences que commencèrent, déjà dans Monteverde, la transformation et la fusion des modes dorien, éolien et phrygien du plain-chant dans notre gamme mineure moderne; ce changement s'accomplit dans le courant du dix-septième siècle, et, grâce à lui, ces modes se prêtèrent davantage à la prépondérance harmonique de la tonique, comme nous le prouverons avec plus de détails.

Nous avons déjà désigné en traits généraux, quelle influence ces transformations avaient exercée sur la nature du système des gammes. Comme ce qui avait servi jusque-là de lien aux phrases musicales, c'est-à-dire l'imitation en canon des mêmes dessins mélodiques, devait partout disparaître par l'introduction d'un accompagnement simple, subordonné à la mélodie, il fallait chercher dans les éléments de l'accord lui-même un nouveau principe de cohésion artistique. On y parvint d'abord en accentuant, d'une manière beaucoup plus précise que par le passé, au moyen de l'harmonie, les relations qui unissaient les sons de la gamme à une tonique prépondérante, en second lieu, en établissant un nouveau lien entre les accords eux-mêmes au moyen de leurs affinités respectives avec l'accord de tonique. Nous verrons, dans la suite de nos recherches, que les propriétés caractéristiques du système moderne peuvent se déduire de ce principe, qui est développé avec une rigoureuse logique dans notre musique moderne. En réalité, la manière dont le matériel musical a été approprié aux exigences artistiques, est déjà par elle-même une œuvre d'art, à laquelle l'expérience, la sagacité, et l'instinct artistique des nations européennes ont travaillé depuis Terpandre et Pythagore, pendant deux mille cinq cents ans. Mais l'apparition des traits essentiels de la forme musicale actuelle date à peine de deux cents ans dans la pratique des compositeurs; le nouveau principe trouve pour la première fois son expression théorique dans Rameau, au commencement du siècle dernier. Au point de vue historique, c'est donc tout à fait un produit du monde moderne, limité aux peuples germains, romains, celtiques et slaves.

Avec ce système musical qui permet une grande richesse de formes dans un tout artistique plus logiquement coordonné, il est devenu possible de créer des œuvres d'art beaucoup plus considérables comme étendue, beaucoup plus riches en formes et en parties diverses, beaucoup plus énergiques en expression, que n'importe quelle époque du passé n'aurait pu en produire; aussi n'entre-t-il pas du tout dans notre intention de contredire les musiciens modernes, quand ils regardent ce système comme le plus considérable de tous, et qu'ils concentrent définitivement leur attention sur lui, de préférence à tout autre. Au point de vue scientifique, néanmoins, si nous cherchons à en expliquer la structure, à en découvrir les conséquences, nous ne

devons pas oublier que le système moderne est le produit, non d'une aveugle fatalité, mais d'un principe de style librement choisi ; nous ne devons pas oublier qu'à côté de lui et avant lui, d'autres systèmes musicaux ont été engendrés par d'autres principes, dans chacun desquels certains problèmes restreints de l'art ont été résolus, de manière à atteindre le plus haut degré de beauté artistique.

Aussi, dans cette troisième partie de notre ouvrage, sera-t-il nécessaire d'avoir égard à l'histoire de la musique, parce que, la plupart du temps, nous ne pouvons plus ici faire appel à l'observation et à l'expérimentation pour confirmer nos hypothèses, car il nous est impossible, à nous élevés dans la musique moderne, de nous replacer complétement dans la situation de ceux qui ne connaissaient rien des choses auxquelles nous sommes habitués dès notre jeunesse, et qui avaient à les chercher pour la première fois. Par conséquent, les seules observations, les seules expériences sur lesquelles nous puissions nous appuyer sont celles que l'humanité a réalisées dans son développement musical. Si notre théorie du système moderne est exacte, elle doit aussi pouvoir expliquer les périodes précédentes, moins parfaites, de ce développement.

Le principe fondamental du développement de la musique moderne consiste, à notre avis, dans les conditions suivantes : *La masse tout entière des sons et des transitions harmoniques doit présenter une affinité étroite et toujours nettement appréciable, avec une tonique librement choisie, qui doit être à la fois le point de départ et le point d'arrivée de tout l'ensemble des sons.*

Le monde ancien a développé ce principe dans la musique homophone, le monde moderne dans la musique harmonique. Mais, comme on le voit, c'est là un principe esthétique, non emprunté aux fatalités naturelles.

Nous ne pouvons, *à priori*, en démontrer l'exactitude ; nous devons le prouver par la vérité de ses conséquences. Il ne faut pas attribuer à une loi inflexible, la naissance de principes esthétiques fondamentaux de ce genre ; ce sont au contraire les produits du génie de l'invention, comme nous l'avons vu précédemment à propos des principes de style en architecture.

CHAPITRE XIV

TONALITÉ DE LA MUSIQUE HOMOPHONE.

La musique a dû choisir et façonner elle-même le matériel artistique qui lui sert à la construction de ses œuvres. Les arts plastiques le trouvent à peu près tout formé dans la nature qu'ils s'efforcent de reproduire ; les couleurs et les formes y sont données dans leurs traits principaux. La poésie le trouve tout fait dans les mots de la langue. L'architecture peut aussi, il est vrai, se créer à elle-même des formes, mais elles sont en partie commandées par des considérations techniques et non purement artistiques. Seule, la musique trouve, dans les sons de la voix humaine et des instruments, un matériel d'une richesse indéfinie, sans forme arrêtée, absolument souple, qu'il s'agit de façonner d'après des principes purement artistiques, sans jamais être arrêté par des considérations d'utilité comme dans l'architecture, par l'imitation de la nature comme dans les arts plastiques, ou par une signification symbolique déjà donnée aux sons, comme dans la poésie. Dans la musique, il règne une liberté, dans l'emploi des matériaux, plus grande et plus complète que dans tout autre art. Mais, de cette liberté absolue même, il résulte qu'il est plus difficile de faire un bon usage de la matière artistique, que là où des points d'arrêt extérieurs viennent délimiter la largeur de la voie que l'artiste doit parcourir. C'est ce qui fait aussi, comme nous l'avons vu, que le perfectionnement du matériel sonore de la musique a été beaucoup plus lent que le développement des autres arts.

C'est ce perfectionnement du matériel sonore que nous avons maintenant à étudier.

La première chose que nous rencontrons, c'est que, dans la musique de tous les peuples connus, *la hauteur du son, dans les mélodies, varie par degrés et non d'une manière continue.* La cause psychologique de ce fait paraît être la même, que celle qui a nécessité la répétition de temps forts dans la division rhythmique. Toute mélodie est un mouvement du son passant par des hauteurs variables. La substance immatérielle des sons se prête, beaucoup mieux que toute autre substance physique moins souple, à suivre par ses mouvements la

pensée du musicien dans toutes ses finesses, dans tous ses détours ; la gracieuse rapidité, la pesante lenteur, la marche calme, l'élan sauvage, tous ces divers caractères de mouvement, et une foule innombrable d'autres, peuvent se représenter, dans leurs nuances et leurs combinaisons les plus multipliées, par une suite de sons. Et, en exprimant ainsi ces différentes sortes de mouvements, la musique représente, en même temps, les états de notre âme susceptibles de déterminer un mouvement du même caractère, qu'il s'agisse des mouvements du corps ou de la voix, ou, plus intimement encore, des idées dans l'entendement. Tout mouvement exprime pour nous les forces qui le produisent et, instinctivement, nous savons juger des forces motrices en observant les mouvements auxquels elles donnent naissance. Cela s'applique aussi bien, et peut-être encore mieux, aux mouvements déterminés par les manifestations de la volonté et des passions humaines, qu'aux mouvements mécaniques de la nature extérieure. De cette manière, le mouvement mélodique des sons peut donc exprimer les états les plus différents de l'âme humaine, non pas les sentiments proprement dits — nous donnons là-dessus raison à Hanslick contre les autres esthéticiens, car il manque à la musique, privée du secours de la poésie, le moyen de désigner clairement l'objet du sentiment, — mais bien, en quelque sorte, la manière dont l'âme *vibre* sous l'influence des sentiments. Le mot *vibrer* est ici évidemment emprunté à la musique pour être appliqué aux divers états de notre âme ; aussi ne doit-il désigner que ces particularités des mouvements de l'âme que la musique peut représenter, et je crois pouvoir rendre exactement ma pensée, en disant que c'est le caractère que présente à un moment donné la marche de nos idées, et qui se manifeste comme répondant à un caractère analogue des mouvements du corps ou de la voix. Nos pensées peuvent se mouvoir avec rapidité ou lenteur ; elles peuvent s'agiter sans repos et sans but dans une excitation inquiète, ou poursuivre avec énergie et détermination un but fixé à l'avance ; elles peuvent se laisser entraîner aisément et sans effort à d'agréables rêveries, ou bien, confinées dans de tristes souvenirs, ne changer d'objet que lentement, péniblement, sans force, et comme à petits pas. Tout cela peut être reproduit et exprimé par le mouvement mélodique des sons, et celui-ci peut donner à l'auditeur attentif une image plus parfaite, plus saisissante de la disposition d'une autre âme que tout autre moyen, à l'exception peut-être de la reproduction très-exacte, par le drame, du geste et du langage de l'individu représenté.

Au reste Aristote a déjà défini l'action de la musique d'une manière tout à fait semblable. Dans le vingt-neuvième problème, il pose

la question suivante : « Pourquoi les rhythmes et les mélodies, c'est-« à-dire les sons, se prêtent-ils à exprimer les mouvements de « l'âme, tandis qu'il n'en est pas de même des goûts, des couleurs « et des parfums? Serait-ce parce que ce sont des mouvements, « comme les gestes? L'énergie particulière aux mélodies et aux « rhythmes, provient d'une disposition de l'âme et agit sur elle. Les « goûts et les couleurs, au contraire, n'y parviennent pas au « même degré. » Aristote dit encore, à la fin du vingt-septième problème : « Ces mouvements (ceux du rhythme et de la mélodie) sont « énergiques ; ce sont des phénomènes qui représentent l'état de « l'âme. »

Et non-seulement la musique, mais aussi d'autres espèces de mouvements peuvent produire des actions analogues. L'eau agitée, par exemple, soit dans une chute, soit dans les vagues de la mer, nous donne l'exemple d'une expression, qui se rapproche dans une certaine mesure de l'expression musicale. Que de temps ne peut-on pas rester, assis sur le rivage, à voir arriver les vagues ! Leur mouvement rhythmé, qui montre, dans l'Unité, une Variété persistante, produit un sentiment particulier, celui d'un calme bienfaisant, sans ennui, et donne l'impression d'une vie puissante, mais ordonnée et déjà articulée, pour ainsi dire. Quand la mer est calme et unie, on peut en admirer quelque temps les couleurs, mais ce spectacle n'est pas attachant d'une manière aussi prolongée que celui des vagues. Au contraire, de petites ondes, courant sur de petites nappes d'eau, se suivent trop brusquement, et fatiguent plutôt qu'elles ne retiennent l'attention.

Mais le mouvement des sons surpasse tous les mouvements de substances matérielles, par la délicatesse et la facilité avec lesquelles il peut recevoir et reproduire les plus grandes variétés d'expression. Il peint *directement* les mouvements de l'âme, résultat auquel les autres arts ne peuvent atteindre qu'indirectement, en représentant soit les causes qui ont déterminé le mouvement, soit les paroles, les gestes, les attitudes extérieures qui l'ont suivi. Ce qu'il y a de plus complet, c'est l'union de la musique aux mots, ceux-ci révélant la cause du mouvement, l'objet auquel il se rapporte, et précisant le sentiment qui lui a donné naissance, tandis que la musique exprime la nature de l'ébranlement communiqué à l'âme par ce sentiment. Quand différents auditeurs cherchent à rendre l'impression produite sur eux par de la musique instrumentale, il arrive souvent que les situations ou les sentiments qu'ils supposent représentés dans les mêmes morceaux, sont très-différents entre eux. Le profane se répand alors en railleries sur ces enthousiastes, et cependant ils peuvent tous

avoir plus ou moins raison, parce que la musique ne dépeint ni des situations, ni des sentiments, mais seulement des dispositions de l'âme, que chaque auditeur ne peut désigner autrement, que par la peinture des événements extérieurs qui déterminent ordinairement en lui des dispositions analogues. Or des sentiments différents, dans différentes circonstances et chez différents individus, peuvent donner naissance aux mêmes dispositions de l'âme ; inversement, les mêmes sentiments peuvent agir d'une manière différente.

Ainsi, l'amour est un sentiment; comme tel, il ne peut être désigné directement par la musique. Comme on sait, la manière d'être d'un amoureux peut offrir les variétés les plus nombreuses. La musique peut peut-être exprimer l'aspiration rêveuse à une félicité infinie que l'amour est susceptible de produire. Mais la même disposition de l'âme peut aussi prendre naissance dans la ferveur religieuse. Si donc un morceau de musique exprime cette disposition, rien ne s'oppose à ce que l'un des auditeurs y trouve l'ardeur de l'amour, l'autre l'ardeur d'un pieux enthousiasme. Dans ce sens, ce n'est pas sans raison que Vischer a pu émettre cette opinion, un peu paradoxale en apparence, que c'est dans l'expression musicale qu'on pourrait peut-être le mieux étudier le mécanisme des mouvements de l'âme. En réalité nous n'avons, pour les exprimer, aucun autre moyen aussi délicat et aussi précis que l'expression musicale.

La mélodie doit donc, comme nous l'avons vu, représenter un mouvement, et cela, de telle manière, que l'auditeur, par une sensation immédiate, puisse en apprécier facilement, clairement et sûrement le caractère. C'est ce qui ne peut arriver que si les phases de ce mouvement, sa rapidité, sa valeur sont aussi de nature à être exactement mesurées par la sensation immédiate. Le mouvement mélodique, c'est le son changeant de hauteur à différents instants. Pour qu'on puisse mesurer ces variations d'une façon complète, il faut que la longueur du temps employé aussi bien que l'étendue de la variation de hauteur soient susceptibles d'être mesurées. Ce double résultat ne peut être accessible à l'observation immédiate, que si le mouvement s'opère par degrés réguliers et bien déterminés, aussi bien dans le temps que dans la hauteur du son. En ce qui concerne le temps, la chose est immédiatement évidente, car, partout, même dans les sciences, la mesure du temps repose sur le retour rhythmé des mêmes événements, sur la révolution de la terre, de la lune, sur les vibrations du pendule. Nous arrivons aussi, par la succession régulière d'accents forts et faibles dans la musique et la poésie, à introduire la mesure du temps dans l'œuvre d'art. Mais, tandis que, dans la poésie, la construction du vers ne sert qu'à introduire une ordon-

nance artistique dans les manifestations extérieures du langage et de l'expression, dans la musique, au contraire, le rhythme, sorte d'unité pour mesurer le temps, le représente pour ainsi dire dans son essence la plus intime ; aussi, le rhythme musical a-t-il exigé une culture beaucoup plus délicate et plus variée que le rhythme de la poésie.

De même, la variation de la hauteur du son doit nécessairement procéder par degrés, car, en général, un mouvement ne peut être mesuré par l'observation que si l'étendue de l'espace parcouru est partagée en divisions. Ainsi, dans les sciences, nous ne pouvons évaluer la vitesse d'un mouvement continu, qu'en mesurant l'espace parcouru avec l'unité de longueur, comme le temps au moyen de la seconde.

On pourrait m'objecter que, dans les arabesques qu'on a comparées avec raison sous beaucoup de rapports aux dessins mélodiques, et qui présentent aussi une sorte d'expression d'un mouvement ordonné, l'architecture emploie fréquemment des courbes continues, et non des lignes interrompues par des divisions formant degrés. Mais d'abord, en réalité, l'art des arabesques tira son origine du méandre grec formé de lignes droites perpendiculaires entre elles, qui se coupaient à intervalles exactement égaux, établissant entre elles des divisions. En second lieu, l'œil qui contemple les arabesques peut embrasser simultanément et comparer entre elles toutes les parties des lignes ondulées ; il peut aller et venir, revoir ce qu'il a vu ; aussi, malgré la continuité de la courbure, le mouvement des lignes est-il parfaitement visible, et on pouvait sans inconvénient abandonner la régularité rigoureuse de la souche grecque des arabesques, pour la liberté de cette branche de l'art. D'ailleurs, si, pour de petits ornements isolés, la liberté des formes est admise en architecture, dans la disposition d'un tout plus considérable, comme une série d'arabesques, ou la série des fenêtres, des colonnes, etc., d'un édifice tout entier, règne toujours la loi arithmétique simple de la répétition de parties égales à intervalles égaux.

Dans une mélodie, les différentes parties ne parviennent que successivement à notre oreille ; nous ne pouvons les percevoir simultanément, nous ne pouvons à notre gré revenir sur ce que nous avons entendu ; il ne reste donc pour mesurer d'une manière claire et certaine les variations de la hauteur du son, que la marche discontinue par degrés bien déterminés. Une série de degrés de ce genre est prescrite dans les gammes musicales. Dans le bruit du vent, quand le son passant, sans interruption, par différentes hauteurs, tantôt monte et tantôt descend, ces variations ne présentent rien qui nous permette de comparer les sons avec ceux qui les ont précédés, ou d'appré-

cier l'étendue du chemin parcouru. L'ensemble produit une impression confuse et désagréable. La gamme musicale est, pour ainsi dire, une échelle divisée au moyen de laquelle nous mesurons la marche de la hauteur du son, remplissant le même office que le rhythme pour le temps. Aussi l'analogie entre la gamme et le rhythme a-t-elle toujours frappé les théoriciens, les plus anciens comme les plus modernes.

Nous trouvons donc, depuis la plus haute antiquité jusqu'à nos jours, et chez tous les peuples qui ont fait de la musique, l'unanimité la plus absolue à choisir, dans le nombre infini des valeurs que peut prendre la hauteur du son variant d'une manière continue, et que peut percevoir l'oreille, certains intervalles déterminés qui forment l'échelle sonore sur laquelle se meut la mélodie. Quant au choix des intervalles, c'est là une question dans la solution de laquelle se manifestent les variétés du goût national, car le nombre des gammes en usage chez les différents peuples et aux différentes époques, est assez considérable.

Demandons-nous donc pourquoi, quand nous partons d'un certain son initial, nous choisissons, pour avancer, un intervalle déterminé, de préférence aux autres. On se souvient que nous avons déjà remarqué un phénomène du même genre dans l'émission simultanée de deux sons. Il a été prouvé que, dans l'assemblage des sons, certains intervalles, les consonnances, se distinguaient de tous les intervalles même peu différents, par le défaut de battements. Nous retrouvons quelques-uns d'entre eux, l'octave, la quinte et la quarte, dans toutes les gammes connues. Les théoriciens modernes, élevés dans le système de la musique harmonique, ont cru pouvoir s'appuyer là-dessus pour expliquer l'origine des gammes, en supposant que toute mélodie naît d'une harmonie qu'on imagine en soi-même, et que la gamme, mélodie principale du ton, provient de la décomposition de l'accord fondamental en ses éléments constitutifs. Ce point de vue est exact pour les gammes modernes ; du moins elles ont été modifiées suivant les exigences de l'harmonie. Mais les gammes ont fait leur apparition dans l'histoire longtemps encore avant les premières expériences sur l'harmonie. Et quand on voit, dans l'histoire de la musique, tout le temps que les musiciens européens ont mis pour apprendre à accompagner harmoniquement une mélodie, et par quels essais informes ils ont débuté dans cette voie, on ne peut douter que le sentiment de l'accompagnement harmonique ne fût absolument inconnu aux anciens compositeurs de la musique homophone, de même qu'aujourd'hui un assez grand nombre encore d'Orientaux mieux doués répugnent à notre harmonie. Il faut encore considérer que beaucoup de mélodies

populaires, soit anciennes, soit d'origine étrangère, ont peine à trouver un accompagnement harmonique qui n'en altère point le caractère.

Il en est de même de l'hypothèse, émise par Rameau, d'une basse fondamentale *sous-entendue* dans la construction d'une mélodie à une voix ou d'une gamme. Un compositeur moderne, à la vérité, pensera le plus souvent la basse fondamentale en même temps que l'air qu'il invente. Mais des musiciens qui n'ont jamais encore entendu de musique harmonique et n'en connaissent même pas l'existence, comment pourraient-ils y parvenir ? Il est évident ici que c'est trop demander, même au génie artistique devinant les choses par une intuition inconsciente, que de prétendre qu'il doit prendre en considération des rapports entre les sons qu'il n'a jamais perçus, ou du moins, qui n'ont que très-rarement frappé son oreille, et qu'il était réservé à une lointaine postérité de découvrir et d'utiliser.

Cependant, bien qu'il soit évident que, dans la période de la musique purement homophone, la gamme ne pouvait être construite d'après les exigences d'assemblages d'accords dont on n'avait pas connaissance ; néanmoins, le point de vue, l'hypothèse des musiciens, peuvent, avec quelques modifications, présenter un sens, si nous admettons que les relations physiques et physiologiques des sons qui se manifestent dans les accords et déterminent la grandeur des intervalles consonnants, peuvent agir aussi sur la construction des gammes, quoique dans des conditions différentes.

Commençons par l'*octave* qui a, avec le son fondamental, la relation la plus frappante. Supposons une mélodie quelconque exécutée par un instrument ayant un bon timbre musical, par exemple par une voix ; indépendamment des sons fondamentaux, l'auditeur entendra les octaves supérieures, et, plus faiblement, les autres harmoniques. Si maintenant une voix plus aiguë chante la même mélodie à l'octave supérieure, *nous entendons de nouveau une partie de ce que nous venions d'entendre*, c'est-à-dire les sons partiels pairs des sons précédents, mais *aucun élément nouveau ne vient s'ajouter à ce que nous avions déjà entendu.* Par conséquent, la reproduction à l'octave d'une mélodie donnée est, en réalité, la répétition partielle des sons précédents. Quand nous faisons accompagner une voix grave par une autre à l'octave au-dessus, et c'était là la seule musique à plusieurs parties en usage chez les Grecs, nous n'ajoutons aux sons graves aucun élément nouveau, nous ne faisons que renforcer les sons partiels pairs. Dans ce sens, les sons d'une octave supérieure sont, en réalité, la répétition au moins partielle des sons de l'octave inférieure. De là la première et la principale division de notre

échelle musicale en une série d'octaves; sous le rapport de la mélodie et de l'harmonie, nous considérons comme équivalents les sons de même nom des différentes octaves, ce qui, dans le sens donné, est exact jusqu'à une certaine limite. L'accompagnement à l'octave donne des consonnances parfaites, mais il n'ajoute rien de nouveau ; il ne fait que renforcer des sons partiels déjà existants. Aussi est-il d'un bon emploi en musique pour renforcer une mélodie qui doit dominer énergiquement, mais il lui manque la variété de la musique polyphone, il ne donne l'impression que d'un seul son, et est proscrit toutes les fois que la musique doit être à plusieurs parties.

Ce qui est vrai de l'octave s'applique aussi, à un degré moindre, à la *douzième.* Si une mélodie est reproduite à la douzième, on entendra de même ce qu'on a déjà entendu, seulement, l'élément répété sera beaucoup plus faible, parce que le troisième, le sixième, le neuvième son partiels seront seuls reproduits, tandis qu'à l'octave, c'est, au lieu du troisième, le second et le quatrième qui sont plus forts, au lieu du neuvième, le huitième et le dixième, etc. La répétition de la mélodie à la douzième est donc plus imparfaite que celle à l'octave, parce qu'il ne se reproduit qu'une plus faible partie de ce qu'on a déjà entendu. On peut encore reproduire la mélodie à l'octave plus bas que la douzième, c'est-à-dire à la quinte. Ici on n'a plus une simple répétition de l'air, comme dans le cas de la douzième.

Si l'on représente par 2 le nombre de vibrations du son fondamental, on a comme sons partiels :

Du fondamental..........	2,	4,	6,	8,	10,	12,
De la douzième...........			6,			12,
De la quinte..............	3,		6,		9,	12.

A la douzième, nous répétons les sons 6 et 12 qui existaient déjà dans le son fondamental. A la quinte, nous répétons les mêmes sons, mais en outre nous obtenons deux sons nouveaux, c'est-à-dire 3 et 9. Dans la reproduction à la quinte, par conséquent, une partie seulement des nouveaux éléments sont identiques avec les anciens, mais c'est, en général, la répétition la plus exacte que nous puissions faire à intervalle moindre qu'une octave. C'est évidemment là ce qui fait qu'encore aujourd'hui des chanteurs peu exercés, en voulant dire en chœur avec d'autres un air qui ne convient pas au registre de leur voix, accompagnent souvent à la quinte, ce qui prouve clairement que même pour une oreille peu habile, la répétition à la quinte, apparaît comme naturelle. Cet accompagnement à la quinte et à la quarte

était systématiquement employé, comme on l'a vu, au début du moyen âge.

D'ailleurs, même dans la musique moderne, la répétition du motif à la quinte joue le principal rôle après celle à l'octave. Dans la fugue normale, comme on sait, le sujet se répète d'abord à la quinte ; dans la forme régulière d'un morceau instrumental, dans la sonate, le thème passe à la quinte dans la première reprise pour revenir au son fondamental dans la deuxième partie. Cette sorte de répétition imparfaite de l'impression, à la quinte, a aussi conduit les Grecs à subdiviser l'étendue de l'octave en deux parties équivalentes, en deux *tétrachordes*. D'après ce principe, notre gamme majeure devrait se diviser ainsi :

ut, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut*, *ré*, *mi*, *fa*.

I II III

Le second tétrachorde est la répétition du premier, à la quinte au-dessus. Pour concorder avec la division en octaves, les tétrachordes successifs doivent être alternativement *conjoints* ou *disjoints*. Ils sont conjoints quand le dernier son du tétrachorde inférieur est le premier du téthracorde supérieur comme dans II et III ; si au contraire, comme dans I et II, le dernier son de l'un et le premier de l'autre sont distincts, on dit que les tétrachordes sont disjoints. Dans le second tétrachorde *sol* — *ut*, toute série ascendante devait rencontrer comme son final l'*ut*, qui est, en même temps, l'octave du fondamental du premier tétrachorde et la quarte du *sol*, fondamental du second tétrachorde. Pour obtenir la même suite de sons dans les deux tétrachordes, il fallait d'abord ajouter au plus grave le son *fa* correspondant à l'*ut*. Au reste la quarte aurait été trouvée, sans avoir recours à cette analogie des tétrachordes, de la même manière que la quinte. Celle-ci est le son dont le premier harmonique coïncide avec le second harmonique du fondamental. La quarte est le son dont le second harmonique coïncide avec le troisième du son fondamental. De cette manière, par conséquent, se trouvent déterminés les sons limites de ces deux subdivisions analogues de l'octave ; ce sont :

ut, *fa*, *sol*, *ut*;

mais la manière de remplir les espaces intermédiaires reste encore indéterminée ; le problème a reçu chez les Grecs eux-mêmes différentes solutions aux différentes périodes ; il a été résolu tout autrement par d'autres peuples anciens, tandis que la division en octaves et la subdivision en deux tétrachordes analogues se retrouvent presque sans exception partout.

D'après une notice de Boethius, depuis la plus haute antiquité jusqu'à Orphée, la lyre n'aurait eu d'autres sons que ceux des deux tétrachordes incomplets,

ut — fa — sol — ut,

éléments au moyen desquels il eût été à peine possible de former une mélodie. Ces sons renferment cependant les intervalles principaux que présentent les accents du langage ordinaire, en sorte qu'une lyre de ce genre pouvait à la rigueur être employée à accompagner la déclamation. Naturellement, toutefois, nous ne pouvons guère reconnaître à ce passage de Boethius un caractère d'authenticité.

On devait penser que le même principe qui avait fourni l'octave, la quinte et la quarte, aurait pu aussi faire trouver les tierces et les sixtes, car, si on fait suivre un son initial de sa tierce majeure, le quatrième harmonique du premier son coïncide avec le troisième du second ; et ce quatrième harmonique s'entend en général encore assez bien dans les bons timbres musicaux. Néanmoins, plus les harmoniques communs sont faibles, et plus, naturellement, il est difficile de percevoir la relation qu'ils établissent entre les sons, d'autant que cette coïncidence peut être, il est vrai, sensible à une oreille non prévenue, mais sans que l'auditeur ait conscience de sa véritable nature. Nous ne devons donc pas nous étonner si la parenté, avec le son fondamental, de l'octave, de la quinte et même de la quarte, a été facilement et clairement remarquée par tous les peuples musiciens ; si, au contraire, la parenté des tierces et des sixtes est beaucoup plus faible, et si ces derniers intervalles ont été, pour la première fois, mis en évidence et déterminés d'une manière précise, par la musique harmonique.

Si donc on ne pouvait pas encore s'appuyer sur cette dernière base, la plus naturelle et la plus logique de toutes, s'il fallait préalablement à l'oreille une éducation encore plus raffinée, quel moyen avait-on de trouver d'autres intervalles dans l'intérieur des tétrachordes? Dans l'établissement des seules subdivisions du tétrachorde que présente probablement la musique indienne ou arabe, dans quelques-unes même de celles établies par les derniers théoriciens grecs, il semble tout à fait qu'on eût lâché la bride à l'arbitraire, ou à des spéculations peut-être mathématiques ou fantastiques. Ainsi, par exemple, du système *diatonique égal* de Ptolémée dans lequel le tétrachorde était divisé en trois intervalles à peu près égaux, dans le rapport de 9 à 10, de 10 à 11, et de 11 à 12 ; ainsi du système *tonique* d'Archytas avec la division dans le rapport de 7 à 8, de 8 à 9, de 27 à 28. Si on voulait établir des divisions arbitraires, on pouvait bien, tout d'abord, arriver à partager le tétrachorde en un certain nombre de parties égales, par

exemple, en trois, comme dans Ptolémée. Et, par le fait, ce système est identique ou à peu près à la gamme aujourd'hui en usage, d'après Villoteau, chez les musiciens ambulants arabes de l'Égypte. De même, les gammes indiennes, avec leurs quarts de ton, ne reposent encore sur aucune base raisonnée et naturelle, au moins d'après les renseignements qu'on possède jusqu'ici, et dans lesquels, à vrai dire, il n'est pas toujours facile de distinguer la pratique du musicien d'avec les spéculations théoriques.

Mais si, dès l'abord, on ne savait pas trouver de nouveaux sons, se rattachant directement au son initial dont on avait l'octave, la quinte et la quarte, et que nous avons appelé *ut*, il était cependant possible de déduire une nouvelle quinte *ré* de l'ancienne quinte *sol*, et une nouvelle quarte *si*♭ de la quarte *fa*. On avait ainsi la gamme suivante :

$$\begin{matrix} ut, & ré, & fa, & sol, & si\flat, & ut_1 \\ 1, & \frac{9}{8}, & \frac{4}{3}, & \frac{3}{2}, & \frac{16}{9}, & 2. \end{matrix}$$

C'est la gamme primitive des Chinois et des Gaëls. Elle présente trois degrés d'un ton, savoir : *ut* — *ré*, *fa* — *sol*, *si*♭ — *ut*, et deux degrés d'un ton et demi, dans le rapport $\frac{32}{27}$, savoir, *ré* — *fa* et *sol* — *si*♭. Ces deux peuples ont employé dans ses parties essentielles cette gamme à cinq sons pour former leurs mélodies, quoique tous deux aient appris à connaître les gammes diatoniques complètes. Ces dernières paraissent avoir été introduites chez les Chinois par un prince Tsay-yu, malgré la résistance des musiciens conservateurs ; de même on a trouvé chez ces peuples instruits et intelligents, la division de l'octave en douze demi-tons, les transpositions des gammes ; mais les mélodies, recueillies par les voyageurs, appartiennent généralement à la gamme à cinq sons. Les Écossais et les Irlandais ont de même appris, par les chants d'Église, à connaître les gammes diatoniques à sept degrés, et néanmoins, dans la forme actuelle de leurs mélodies populaires, nous constatons que les deux sons complémentaires manquent absolument, ou du moins ne font que de rares apparitions, comme appoggiatures ou notes de passage. Et alors, dans beaucoup de cas, ce sont des corrections modernes, comme on peut le prouver par la comparaison avec l'ancienne forme des airs ; on peut, en général, négliger les notes étrangères à la gamme de cinq sons, sans altérer essentiellement la mélodie. Cela s'applique non-seulement aux anciens airs, mais même à ceux composés dans les deux derniers siècles par des musiciens savants ou ignorants, et qui se sont répandus dans le peuple.

Par conséquent les Gaëls, aussi bien que les Chinois, maintiennent

leur ancienne gamme, malgré la connaissance des systèmes modernes (1), et on ne peut nier que les airs écossais, en proscrivant le plus petit degré de la gamme diatonique, ne présentent quelque chose de particulièrement clair et alerte, qu'on ne trouve pas, il est vrai, dans les mélodies chinoises. Le petit nombre des sons renfermés dans l'intérieur de l'octave, est compensé par la grande étendue que parcourent les voix, aussi bien chez les Gaëls que chez les Chinois.

En ce qui concerne la tonalité de la gamme gaélique et chinoise, elle se déduit de son mode de formation, qui ne repose pas exclusivement sur un seul son avec lequel tous les autres présentent une parenté directe. Les sons *fa* et *sol* sont, il est vrai, unis à l'*ut* par une parenté directe, mais le *ré* ne se rattache qu'au *sol*, et le *si*♭ qu'au *fa*. La gamme forme dans son ensemble une série de quintes enchaînées,

si♭ — *fa* — *ut* — *sol* — *ré*,

chaque terme se rattachant au précédent et au suivant; mais la parenté d'un son déterminé quelconque avec tous les autres, ne domine pas assez pour qu'on ait le droit de le considérer comme la tonique. C'est cependant en maintenant l'*ut* comme tonique que les sons se trouvent reliés le plus étroitement entre eux; alors, en effet, les notes les plus éloignées, *si*♭ et *ré*, ont cependant une parenté, du second degré, il est vrai, avec l'*ut*. Si nous prenions *fa* ou *sol* comme tonique, dans la série des quintes, le *ré* ne présenterait avec le *fa*, et le *si*♭ avec le *sol* qu'une parenté du troisième degré. Enfin, si la tonique choisie était le *si*♭ ou le *ré*, chacun des sons serait à une distance de quatre quintes de l'autre, ce qui constitue une parenté du quatrième degré.

Nous avons vu que le lien des tierces et des sixtes avec le son fondamental n'était pas assez manifeste pour permettre à lui seul, dans la première période du développement de la pratique musicale, d'arriver à trouver ces intervalles, et à les déterminer d'une manière précise ; nous reviendrons là-dessus à propos de la gamme diatonique grecque. Néanmoins, à la suite d'une éducation plus avancée de l'oreille, on peut reconnaître la parenté directe de ces intervalles avec le son fondamental, quand une fois on les a trouvés par la série des quintes, sur un instrument à sons fixes. Cette série ne donne pas, il est vrai, les véritables tierces et sixtes, mais des intervalles qui s'en rapprochent tellement, qu'on peut les substituer sans difficulté dans une suite mélodique.

(1) Mélodies chinoises dans l'*Histoire de la Musique*, par Ambrosch, vol. I, p. 30, 34, 35. — *Recueil d'airs écossais*, avec indication des sources et des anciennes formes dans les *Chants d'Écosse* de Graham. Édimbourg, 1859. L'accompagnement de piano moderne s'accommode souvent assez mal au caractère des mélodies.

Dans la gamme à cinq degrés, trouvée plus haut, comme dans la gamme diatonique des Grecs, établie par Pythagore, on a les rapports :

$$ré : fa = \frac{9}{8} : \frac{2}{3} = \frac{27}{16} = \frac{5}{3} \times \frac{81}{80};$$
$$si\flat : sol = \frac{16}{9} : \frac{3}{2} = \frac{32}{27} = \frac{6}{5} \times \frac{80}{81};$$
$$ré : si\flat_{-1} = \frac{9}{8} : \frac{8}{9} = \frac{81}{64} = \frac{5}{4} \times \frac{81}{80}.$$

La sixte ainsi trouvée par la série des quintes, fa_{-1} — *ré*, et que nous pouvons appeler sixte majeure *pythagoricienne*, est donc dans le rapport de 81 à 80, c'est-à-dire de $\frac{1}{10}$ de ton plus haute que la sixte consonnante naturelle. La tierce mineure *pythagoricienne* est trop basse, la tierce majeure trop haute de la même quantité. Mais, quoique cette différence, comme nous le verrons plus tard, soit assez forte pour rendre très-désagréable une harmonie plaquée, elle est encore trop petite pour pouvoir être appréciée, à moins d'une attention toute particulière, dans une suite mélodique de sons. Par conséquent, si une mélodie, procédant de quinte en quarte, ou si des instruments accordés suivant la série des quintes donnaient la tierce pythagoricienne, l'auditeur pouvait prendre l'unisson presque complet du troisième harmonique de la tierce avec le quatrième du fondamental, pour l'indice de la parenté des deux sons, quoiqu'en réalité l'unisson absolu n'existe que pour la tierce naturelle.

En disposant d'après ces remarques la gamme à cinq sons, de manière à prendre successivement chacun d'eux pour tonique, nous avons les formes suivantes :

1° *ut — ré — fa — sol — si♭ — ut*
2° *fa — sol — si♭ — ut — ré — fa*
3° *sol — si♭ — ut — ré — fa — sol*
4° *si♭ — ut — ré — fa — sol — si♭*
5° *ré — fa — sol — si♭ — ut — ré,*

ou, en rapportant tout à la tonique *ut* :

1°	*ut* —	*ré* —	*fa* —	*sol* —	*si♭* —	*ut*
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{16}{9}$	2
2°	*ut,*	*ré,*	*fa,*	*sol,*	*la,*	*ut*
	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$ $\left(\frac{5}{3}\right)$	2

3° *ut — mi♭— fa — sol — si♭ — ut*

1	$\frac{32}{27}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{16}{9}$	2
	$\left(\frac{6}{5}\right)$				

4° *ut — ré — mi — sol — la — ut*

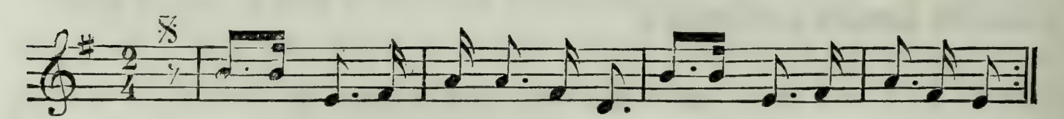
1	$\frac{8}{9}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$	2
		$\left(\frac{5}{4}\right)$		$\left(\frac{5}{3}\right)$	

5° *ut — mi♭— fa — la♭ — si — ut*

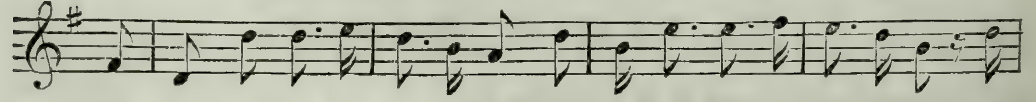
	$\frac{32}{27}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{128}{81}$	$\frac{16}{9}$	2
	$\left(\frac{6}{5}\right)$		$\left(\frac{8}{5}\right)$		

Si, au lieu des intervalles obtenus par la série des quintes, nous prenons les intervalles consonnants correspondant à ceux inscrits entre parenthèses, nous faisons disparaître de ces cinq gammes, toutes les relations d'un degré supérieur au second, qui se trouvent remplacées par des relations directes quoique plus faibles. Les gammes se trouvent donc alors toutes également justifiées, et, par le fait, on peut trouver des mélodies appartenant à chacune d'elles. Je donne ici les airs suivants à titre d'exemples.

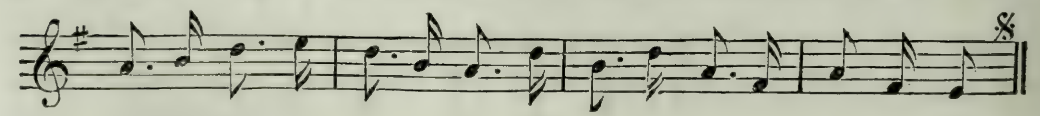
1. *Première gamme, sans tierce, nisixte.* Un vieil air gaël, probablement de cornemuse (1) :



Blythe, blythe and merry are we, blythe are we one and all.
Can-ty days we've of-ten seen; a night like this ne-ver saw.



The gloaming saw us all sit down, and meikle mirth has been our fall. Then

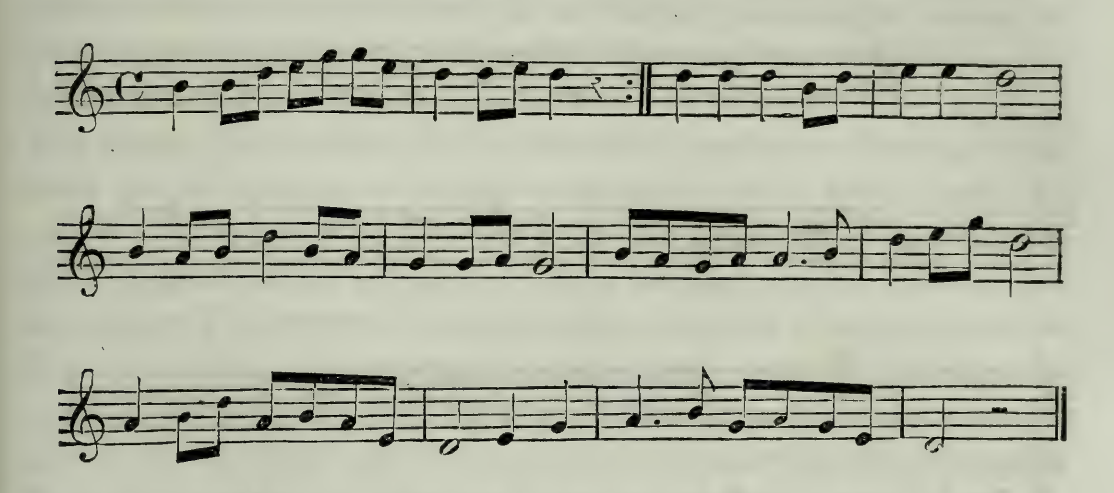


D.C. al Segno.

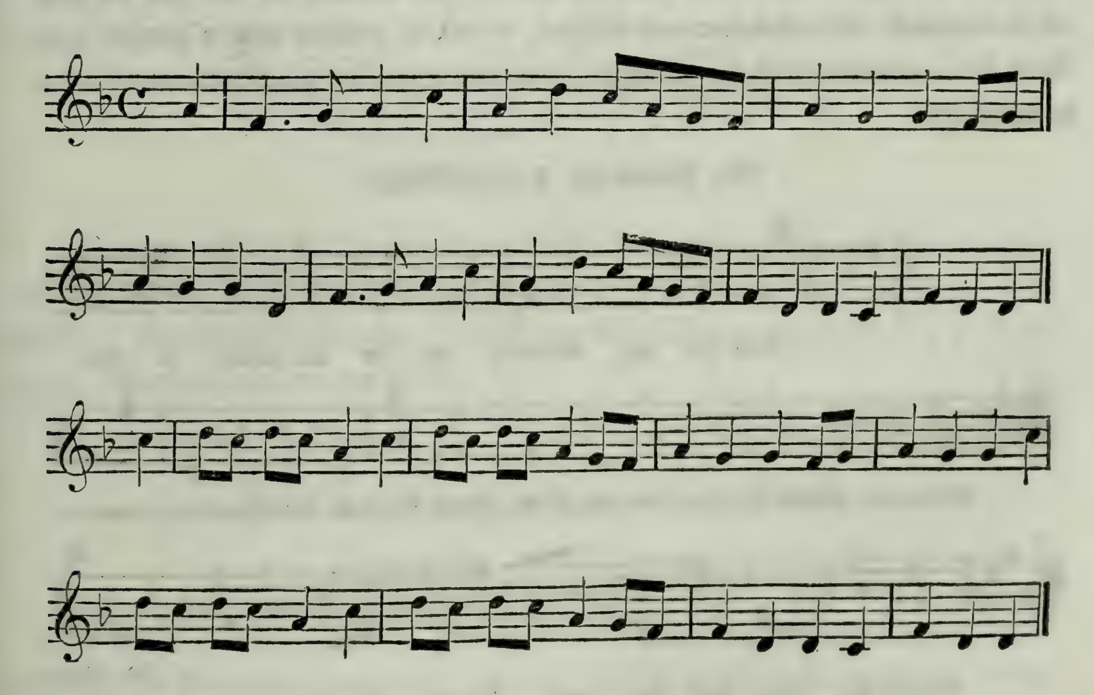
let the toast and sang go round, till chan - ti cle -er be - gins to craw.

(1) Air chinois, analogue dans Ambrosch, *loc. cit.*, vol. I, p. 34 ; le second morceau. — Un autre, avec une seule sixte, dans les *Chants d'Écosse*, vol. III, p. 10 : « *My Peggy is a young thing.* »

2. *Seconde gamme, sans tierce, ni septième.* — Air chinois d'après John Barrow :



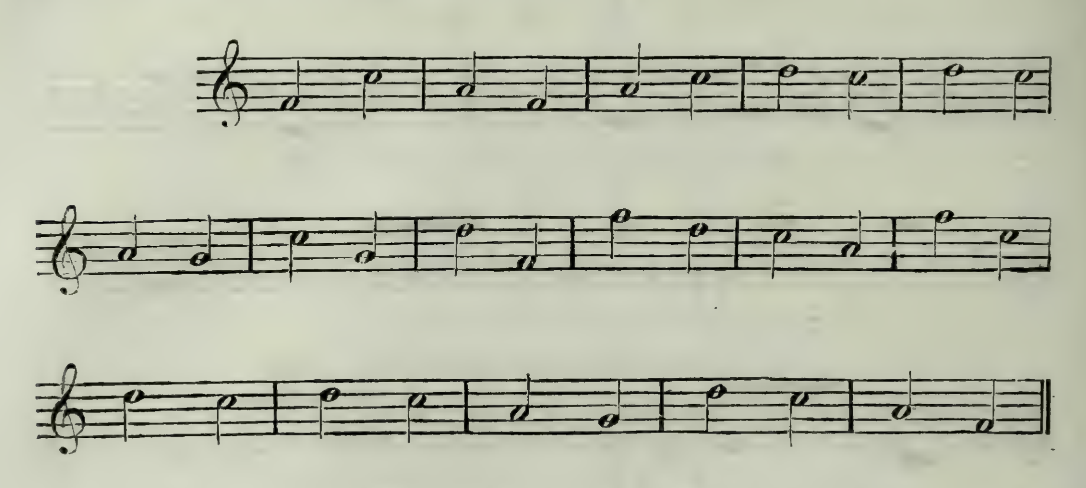
3. A la *troisième gamme, sans seconde, ni sixte*, appartiennent la plus grande partie des airs écossais qui ont le caractère mineur ; dans les formes modernes cependant, en général, on trouve l'un ou l'autre de ces intervalles employé de passage. Ci-dessous, une ancienne forme (1) de l'air *Cockle Shells.*



4. A la *quatrième gamme*, appartiennent la majeure partie des airs écossais qui présentent le caractère majeur ; il y manque la quarte et la septième de la gamme majeure. Comme les mélodies écossaises de ce genre se trouvent par douzaines dans tous les recueils et sont gé-

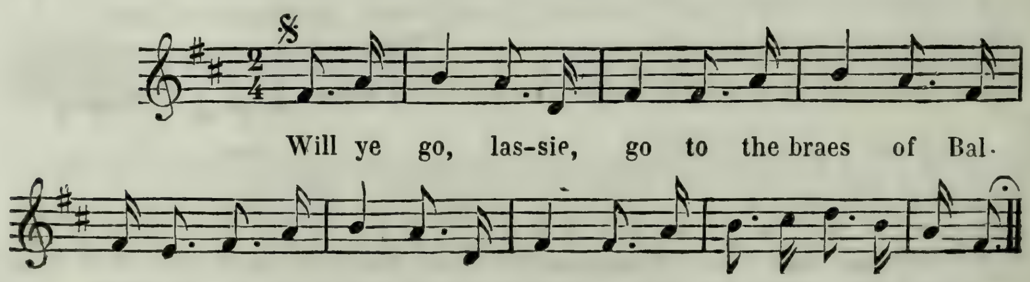
(1) Playford, maître de danse, édition 1721 ; la première fut publiée en 1657. — *Chants d'Écosse*, vol. III, p. 170.

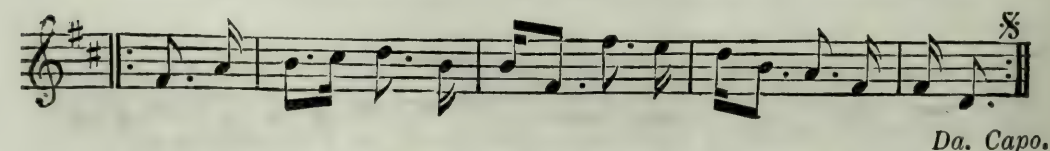
néralement connues, je donne ici comme exemple un vieil air religieux chinois, d'après Bitschurin (1).



5. Je n'ai pas trouvé d'air appartenant exclusivement à la *cinquième gamme, sans seconde, ni quinte;* il en existe cependant, où la quinte seule ou les deux intervalles ne se présentent que tout à fait exceptionnellement. Dans le dernier cas, on rencontre la seconde mineure qui donne le caractère du mode phrygien de l'Église, par exemple, dans la très-jolie chanson : *Auld Robin.* Je donne ici un air en *fa*♯ où la seconde fait absolument défaut, et où la quinte *ut*♯ n'arrive que deux fois comme note de passage, en sorte qu'on pourrait aussi bien la négliger.

The Braes of Balquhidder.



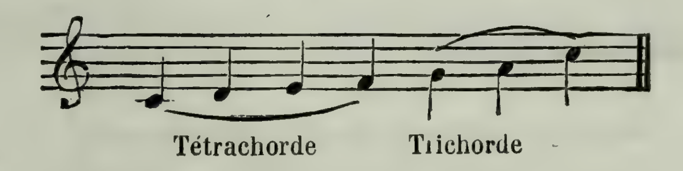


La règle donnée ordinairement que, dans les gammes gaéliques et chinoises, il n'existe ni quarte, ni septième, ne s'applique donc qu'à la gamme à cinq sons qui correspond à notre gamme majeure, et qui

(1) Ambrosch, *loc. cit.*, vol. I, p. 30. — Voir aussi le *Premier air*, p. 35, d'après Baron et Amiot.

domine dans les airs écossais d'aujourd'hui, probablement par réaction contre l'influence de notre système moderne. Les exemples cités précédemment prouvent que la tonique peut occuper toutes les places dans les gammes à cinq sons, si on veut leur accorder la propriété d'avoir une tonique. Les mélodies écossaises, sans exception, sont dépourvues de deux sons de notre mode majeur et mineur, de telle sorte que le demi-ton de la gamme devient le ton et demi. Parmi les airs chinois, en tout cas, j'en trouve un qui se rattache à l'ancien système enharmonique des Grecs inventé plus tard, et qui présente des demi-tons; il y trouvera son explication. Quant à l'absence, dans les chants écossais, des intervalles les plus écartés, elle provient probablement d'une série de quintes originairement trop restreinte, et qui ne pouvait être prolongée assez loin pour donner naissance à des intervalles plus petits que des tons entiers, les seuls s'adaptant à tous les cas.

On trouve aussi, chez les Grecs, des traces de l'existence de semblables lacunes dans les gammes. Terpandre enrichit l'ancienne lyre à quatre cordes de trois autres, dont les deux extrêmes formaient une octave, accordées d'après Ottfried Müller (1), ainsi qu'il suit, d'après le système lydien :



Cette gamme était formée d'un tétrachorde et d'un trichorde; elle correspond à notre gamme majeure d'où on ôterait la septième. De même, Nicomaque donne l'heptachorde dorien, antérieur à Pythagore, où manque encore le *si* :



Les Grecs avaient la plus haute estime pour les errements de Terpandre, et Pindare employait encore son heptachorde quoiqu'à cette époque la gamme diatonique complète fût connue depuis longtemps (2).

La première de ces deux gammes s'adapte d'ailleurs aussi à beaucoup de mélodies écossaises dans leur forme actuelle, où s'est intro-

(1) *Histoire de la littérature grecque*, 2e édit., vol. I, p. 270.

(2) La mélodie attribuée à Pindare « Χρυσέα φόρμιγξ, » rentre dans la gamme de Müller; le plus haut son n'y est pas employé.

duite la quarte qui, originairement, faisait défaut. De même, d'après une notice de Plutarque Olympos, qui doit avoir régularisé et répandu en Grèce le jeu de la flûte, un musicien, vraisemblablement contemporain de Terpandre quoique plus jeune, a employé dans son système les trichordes tels qu'ils se rencontrent dans la gamme à cinq sons.

ut — ré — fa — sol — la — ut.

L'ancienne gamme à cinq sons pouvait s'enrichir de deux manières. Il était logique d'intercaler encore deux nouveaux sons au moyen des quintes, de même qu'on avait déduit la seconde et la septième du son initial de la quinte et de la quarte. Nous trouvons dans la gamme à cinq sons la série des quintes :

fa — ut — sol — ré — la.

Terpandre ajouta la quinte *la — mi*, et Pythagore *mi — si*, ce qui complète la gamme diatonique par quintes :

fa — ut — sol — ré — la — mi — si,

ou, dans l'ordre habituel :

ut — ré — mi — fa — sol — la — si — ut.

Mais, avant d'avoir ainsi complété la gamme diatonique, on paraît avoir eu recours à un moyen moins rationnel pour accroître la richesse de la gamme. De même que quelques peuples asiatiques ont cherché à remplir arbitrairement l'espace compris entre le son fondamental et la quarte, de même, on introduisit des degrés arbitraires dans les trichordes de la gamme à cinq sons, et c'était même plus facile pour l'oreille, de partager en deux, le plus petit intervalle d'un trichorde de ce genre qui comporte un ton entier, que l'intervalle, plus grand, d'un ton et demi, dans lequel la hauteur du son intercalaire serait restée encore assez douteuse, tant qu'on n'avait aucun principe certain pour en déterminer la position. Donc, au lieu du trichorde :

ut — ré — fa ou *ré — mi — sol,*

on employait le tétrachorde :

ut — ut♯ — ré — fa ou *ré — ré♯ — mi — sol*

$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ 1 1/2 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ 1 1/2.

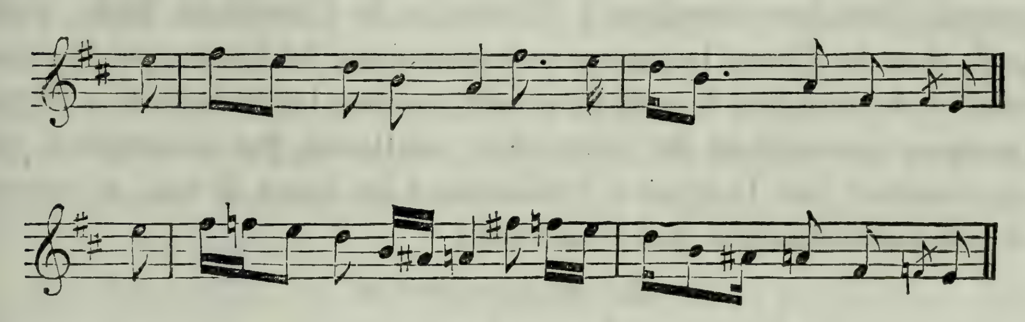
ce qu'on appelait un tétrachorde *chromatique* par opposition aux tétrachordes *diatoniques*, parmi lesquels on distinguait trois variétés :

Variété lydienne............. *ut — ré — mi — fa*
1 1 1/2

Variété phrygienne.......... *ré — mi — fa — sol*
1 $\frac{1}{2}$ 1

Variété dorienne............. *mi — fa — sol — la.*
$\frac{1}{2}$ 1 1

Bellermann admet avec raison, que l'intercalation de l'*ut*♯ entre l'*ut* et le *ré* tire son origine de la manière dont la voix passe d'un son à un autre, ce que les instruments, la cithare et les flûtes, ne pouvaient imiter qu'en intercalant un nouveau son. On trouva plus tard le mode chromatique, voluptueux, mou, larmoyant (1), et, en effet, on peut donner quelque chose de très-larmoyant à une mélodie écossaise, en en déformant les intervalles suivant les règles de la chromatique grecque, par exemple :



La propriété des anciennes gammes à cinq sons de remplacer les tétrachordes lydien ou phrygien des gammes diatoniques par des trichordes, en supprimant le troisième son de chaque tétrachorde, s'introduisit, d'après le témoignage de Plutarque Olympos, dans la gamme dorienne qui représentait la gamme grecque, par opposition aux systèmes asiatiques. De même, par conséquent, que le mode lydien avait, de *ut — ré — mi — fa*, tiré *ut — ré — fa*, et le mode phrygien, de *ré — mi — fa — sol*, tiré *ré — mi — sol*, Olympos, du mode dorien :

mi — fa — sol — la,

fit :

mi — fa — la.

Ce dernier trichorde se distinguait des deux précédents en ce que son premier degré est un demi-ton, et les deux autres intervalles

(1) Aristide Quintil., éd. Meibomius, p. 18. Anonyme de Bellermann, sect. 26.

sont d'un ton entier. Ces trichordes d'Olympos, appelés *enharmoniques,* ne pouvaient prendre naissance qu'après la découverte de la gamme diatonique; aussi Plutarque rapporte-t-il, d'après une notice d'Aristoxène, qu'avant Olympos tout était diatonique ou chromatique; c'est reconnaître expressément que le mode enharmonique est venu le dernier. Quant à la question de savoir si Olympos a altéré la gamme diatonique dorienne à l'imitation de l'ancienne gamme à cinq sons, qu'on ne peut supposer connue chez les peuples de l'Asie occidentale qu'en s'appuyant sur l'existence du mode chromatique, et de la lyre à sept cordes de Terpandre, c'est une hypothèse d'Ambrosch qui me paraît présenter beaucoup de vraisemblance. L'ancienne gamme enharmonique d'Olympos aurait été dans une octave :

mi — fa — la — si — ut — mi.

$\frac{1}{2}$ 2 1 $\frac{1}{2}$ 2

Cette gamme se trouve aussi dans des morceaux chinois (1), où elle peut avoir pris naissance de la même manière, par l'abréviation de la gamme diatonique complète à l'imitation de l'ancienne. Enfin, plus tard, chez les Grecs, la gamme enharmonique fut formée par l'intercalation de sons dans le petit intervalle, comme les tétrachordes chromatiques provenaient des trichordes asiatiques. Par conséquent, en représentant par le signe × l'élévation d'un quart de ton, le tétrachorde *enharmonique* était le suivant :

mi — mi × — *fa — la*

$\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$ 2,

création assez singulière et monstrueuse qui était tombée en désuétude (2) déjà du temps d'Aristoxène, un élève d'Aristote, dont les écrits sont restés ce qu'il y a de plus ancien sur la musique grecque. Selon Plutarque, on abandonnait les quarts de ton quand on voulait faire de la musique à la manière antique. Ainsi s'explique la contradiction des opinions relativement au mode enharmonique : on vantait beaucoup l'ancien système, trouvant le nouveau lourd et antimélodique. Aristoxène explique aussi que les mélodies où n'existe pas le lichanos (le troisième son du tétrachorde), loin d'être mauvaises, sont les meilleures (3).

L'*enharmonique* d'Olympos paraît une inconséquence, si l'on veut

(1) Ambrosch, *Histoire de la musique*, vol. I, p. 35; le second morceau rapporté d'après du Halde.

(2) D'après une opinion d'Aristoxène, citée par Théon.

(3) Aristoxène, vol. I, p. 23.

déduire la construction de la gamme de la série des quintes. On abandonne en effet les premiers sons donnés par la série pour les autres. Avait-on déjà un sentiment plus net de la parenté des tierces ? Dans les trichordes de la gamme à cinq sons :

ut — ré — fa ou *ré — fa — sol*

une tierce mineure était intercalée dans la quarte ; dans les trichordes d'Olympos, au contraire,

mi — fa — la, ou *sol — si — ut*

le son central est la tierce majeure de l'un des sons extrêmes, et la sensible de l'autre, si l'on veut admettre des sensibles dans un mouvement descendant, ce qui ne se présente pas dans les gammes modernes. La tierce majeure est d'ailleurs un intervalle qu'on saisit plus nettement que la tierce mineure. C'est peut-être là l'origine de la découverte d'Olympos. De même, au quatrième siècle avant J.-C., Archytas avait trouvé, pour le plus grand intervalle du mode enharmonique, le vrai rapport $\frac{5}{4}$ de la tierce majeure consonnante, tandis que ce rapport n'a été fixé que beaucoup plus tard par Didymus, dans la gamme diatonique. On pouvait en effet, dans le mode diatonique, accorder les intervalles en procédant par série de quintes, et les musiciens mathématiciens faisant leurs calculs en s'appuyant sur cette base. Dans les modes enharmoniques, au contraire, la série des quintes était interrompue, et, par suite, on trouvait plus facilement les rapports naturels.

Au reste, toutes les transformations successives proviennent de la *gamme diatonique* à sept sons, qui a été proposée et inventée par Pythagore dans l'étendue complète d'une octave. La construction originelle de cette gamme repose sur la série des quintes ; c'est ce qui ressort de la comparaison avec les gammes précédentes, aussi bien que des définitions des intervalles données par Pythagore. Ils sont tous, en effet, évalués en quintes. En posant ut_1 égal à 1, on trouve la série :

$$\begin{array}{ccccccc} fa & — ut_1 & — sol_1 & — ré_2 & — la_2 & — mi_3 & — si_3 \\ \frac{2}{3} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{9}{4} & \frac{27}{8} & \frac{81}{16} & \frac{243}{32} \end{array}$$

où la valeur numérique de chaque terme s'obtient en multipliant le précédent, par $\frac{3}{2}$, rapport de la quinte. En réduisant ces sons à l'octave ut_1 — ut_2, nous avons :

$$\begin{array}{ccccccc} fa_1 & — ut_1 & — sol_1 & — ré_1 & — la_1 & — mi_1 & — si_1 \\ \frac{4}{3} & 1 & \frac{3}{2} & \frac{9}{8} & \frac{27}{16} & \frac{81}{64} & \frac{243}{128}. \end{array}$$

Ce sont les nombres calculés par Pythagore.

En plaçant les sons dans l'ordre habituel, la gamme

ut,	*ré,*	*mi,*	*fa,*	*sol,*	*la,*	*si,*	*ut,*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	2

contient cinq degrés dans le rapport de $\frac{9}{8}$, dont chacun est égal à la distance de la quarte à la quinte, et deux degrés plus petits, appelés par les Grecs *Limma* dans le rapport de $\frac{256}{243} = \frac{16}{15} \times \frac{80}{81}$, qui sont un peu plus petits (de $\frac{1}{10}$ de ton) que le demi-ton $\frac{16}{15}$ de la gamme diatonique naturelle.

On peut considérer les calculs de Pythagore comme l'expression naturelle de la manière dont les instruments sont accordés. On ne pouvait fixer théoriquement les intervalles et la disposition des sons, avant d'employer des instruments au moyen desquels on pouvait fixer les hauteurs. De plus, les Grecs ont, depuis la plus haute antiquité, fait usage d'instruments à cordes pour accompagner le chant. Or, sur des instruments de ce genre, il est beaucoup plus facile de procéder par quintes que par tierces, dont l'oreille n'apprécie que faiblement la justesse dans une progression purement mélodique. Déjà la lyre à sept cordes de Terpandre pouvait être accordée suivant une série de quintes. Quant à la manière dont les Grecs se servaient à l'origine de la lyre à quatre cordes, où la série des quintes est deux fois interrompue, nous devons la laisser indécise. Par exemple, le tétrachorde dorien *mi — fa — sol — la*, est compris dans la série de quintes :

fa — (ut) — sol — (ré) — la — mi,

et l'instrument ne donne ni l'*ut* ni le *ré*. Le musicien devait donc ou bien accorder de sentiment, ce qui aurait été non-seulement plus facile mais meilleur pour une oreille délicate, ou bien accorder la corde *mi*, d'abord sur l'*ut*, ensuite sur le *ré* jusqu'à ce qu'il trouvât le *la* à partir du *fa ;* il devait ainsi déterminer la quinte *la — mi.*

La gamme diatonique ainsi obtenue pouvait être prolongée indéfiniment en haut ou en bas, au moyen des octaves des sons qui la composent, et donnait une suite régulière de tons et de limmas. Seulement, dans chaque morceau de musique, on n'employait qu'une portion de la gamme indéfinie, et on distinguait les divers systèmes, par la différence des portions employées.

Maintenant, on peut interpréter de différentes manières la signification de ces gammes limitées. Le première nécessité qui a dû s'im-

poser à la pratique, tant qu'on a fait usage d'un instrument ayant un nombre limité de cordes, comme la lyre grecque, était évidemment de retrouver sur les cordes de la lyre tous les sons que présentait le morceau de musique. On déterminait par cette considération une série de sons que reproduisaient les cordes de l'instrument. Si on nous donne comme gamme une semblable série de sons, cela ne nous apprend rien, en général sur la question de savoir s'il y a une tonique et quelle elle est. On trouvera un assez grand nombre de mélodies ayant pour tonique le son le plus grave, d'autres où figure la note sensible au-dessous de la tonique, d'autres où la quinte ou la quarte de l'octave grave sont la note la plus basse. La différence entre les gammes *authentiques* et *plagales* du moyen âge est de même nature. Dans les authentiques, c'est le son le plus grave de la gamme qui était la tonique, dans les plagales, c'était la quinte, par exemple :

Premier mode authentique du plain-chant, tonique *ré*.

ré — *mi* — *fa* — *sol* — *la* — *si* — *ut* — *ré*

Quatrième plagale, tonique *sol*.

ré — *mi* — *fa* — *sol* — *la* — *si* — *ut* — *ré*.

On les considérait, ainsi que le montrent les accolades, comme formées d'une quarte et d'une quinte ; la quinte était en bas dans les authentiques, et en haut dans les plagales. Si on ne nous donne rien autre chose qu'une gamme qui s'applique à l'assemblage fortuit d'une série de mélodies, nous ne pouvons en tirer que peu d'inductions sur le ton. Nous pouvons appeler gammes *accidentelles* celles qui s'adaptent seulement à certains airs (1), et gammes *essentielles*, celles qui, à la façon moderne, sont limitées en haut et en bas par la tonique. — Or, il est évident que les nécessités de la pratique n'ont pu conduire d'abord qu'aux gammes accidentelles. Il était absolument indispensable que la lyre, au moyen de laquelle on voulait accompagner le chant à l'unisson, fût accordée de manière à présenter tous les sons de l'air. Il n'y avait point d'intérêt pratique immédiat à désigner un son comme la tonique d'un chant à une partie, et même à s'expliquer son existence, ses relations avec les autres sons. Il en est tout autrement dans la musique moderne, où la structure de l'harmonie dépend essentiellement de la tonique. Des considérations théoriques sur la structure de la mélodie peuvent seules conduire à une définition de la tonique. Comme esthéticien, Aristote a laissé quelques notices sur ce sujet, mais, en revanche, les auteurs qui ont particulièrement écrit sur la musique

(1) Entre autres, les gammes plagales du moyen âge.

n'en disent pas un mot; on l'a déjà vu dans le précédent chapitre.

A l'apogée de la civilisation grecque, pour accompagner le chant suivant les règles, on faisait usage de lyres à huit cordes, dont la tablature correspondait à l'étendue de l'une des octaves empruntées à la gamme diatonique ; c'étaient les suivantes :

1. Mode lydien :

ut — ré — mi — fa — sol — la — si — ut.

2. Mode phrygien :

ré — mi — fa — sol — la — si — ut — ré.

3. Mode dorien :

mi — fa — sol — la — si — ut — ré — mi.

4. Mode hypolydien (syntonolydien) :

fa — sol — la — si — ut — ré — mi — fa.

5. Mode hypophrygien (ionien) :

sol — la — si — ut — ré — mi — fa — sol.

6. Mode hypodorien (éolien ou locrien) :

la — si — ut — ré — mi — fa — sol — la.

7. Mode mixolydien :

si — ut — ré — mi — fa — sol — la — si — (ut).

Chaque degré de la gamme diatonique pouvait donc être employé comme son initial ou final d'un mode particulier. Les séries lydienne et hypolydienne, phrygienne et hypophrygienne, dorienne et hypodorienne, présentent chacune les tétrachordes de même nom. Dans le mode mixolydien, on paraît avoir admis deux tétrachordes lydiens dont l'un est tronqué, comme l'indiquent les accolades ci-dessus.

Jusqu'ici on a considéré ces gammes (tropes) de l'époque grecque, comme essentielles; en d'autres termes, on a supposé que le son le plus grave (*hypate*) de chacune d'elles en était la tonique. Mais, à mon avis du moins, cette hypothèse ne repose sur aucune base certaine. Comme nous l'avons vu, ce que dit Aristote à ce sujet tendrait à faire considérer le son central (le *mese*) comme étant la tonique, tandis que d'autres attributs de notre tonique se rapportent à l'hypate (1).

(1) Platon qualifie le mixolydien (de *si* en *si*), et le syntonolydien (de *fa* en *fa*), de mauvais, de pleurard, ce qui ne peut avoir un sens que dans le cas où le *si* et le *fa* sont considérés comme sons fondamentaux; l'un des modes, en effet, se trouve avoir une fausse quarte, l'autre une fausse quinte. C'est dans le mixolydien, suivant Plutarque, que Lamproclès a découvert que le son diazeuctique est en haut, c'est-à-dire que c'est une gamme plagale dorienne :

si — ut — ré — mi — fa — sol — la — si.

Mais, que la tonique ait été le *mese* ou l'*hypate*, que les gammes aient été toutes plagales ou toutes authentiques, il n'en résulte pas moins très-vraisemblablement que les Grecs mêmes, chez lesquels nous trouvons pour la première fois la diatonique complète, se permettaient de prendre pour tonique tous les sons de la gamme, exactement comme nous l'avons vu pour la série à cinq sons des Chinois et des Gaëls. Nous retrouvons les mêmes gammes, empruntées directement aux anciennes traditions selon toute vraisemblance, dans l'ancien plain-chant chrétien. Par conséquent, dans le chant homophone, en faisant abstraction des gammes chromatiques et enharmoniques, ainsi que de celles tout à fait arbitraires des peuples d'Asie, qui ne se sont montrées susceptibles d'aucun progrès, il existait sept gammes diatoniques présentant entre elles des différences de même nature que celles de notre mode majeur et de notre mode mineur. Ces différences apparaissent plus nettement quand on rapporte toutes les gammes à la même tonique *ut*:

MODES		NOTATION DE GLAREANUS.	NOUVELLE NOTATION PROPOSÉE.
Lydien.......	*ut—ré —mi —fa—sol —la —si —ut*	Ionien.......	Mode majeur.
Ionien........	*ut—ré —mi —fa—sol —la —si♭—ut*	Mixolydien..	Mode de quarte.
Phrygien.....	*ut—ré —mi♭—fa—sol —la —si♭—ut*	Dorien.. ...	Mode de septième.
Éolien........	*ut—ré —mi♭—fa—sol —la♭—si♭—ut*	Éolien......	Mode de tierce, ou mineur.
Dorien.......	*ut—ré♭—mi♭—fa—sol —la♭—si♭—ut*	Phrygien...	Mode de sixte.
Mixolydien....	*ut—ré♭—mi♭—fa—sol♭—la♭—si♭—ut*	Lydien.....	Mode de seconde.
Syntonolydien.	*ut—ré —mi —fa♯—sol —la —si —ut*		Mode de quinte.

En outre, les écrivains distinguent le mode éolien et le mode locrien (Athénée, t. XIV, p. 624), et cependant ils disent que tous deux doivent appartenir à la famille des octaves hypodoriennes; en sorte que la série diatonique de *la* en *la* porte trois noms différents qu'on ne peut considérer comme tout à fait équivalents. De même, Plutarque indique l'ionien et les syntonolydiens comme semblables. Tout cela ne peut s'expliquer autrement que par l'hypothèse de Bellermann, à savoir que ces noms désignent les uns des gammes authentiques, les autres des gammes accidentelles; malgré l'identité de la série des sons, la mélodie devait, dans chacun d'eux, être construite suivant des règles particulières. Mais si la série la plus antimélodique, le mixolydien de *si* en si_1, a été usitée d'abord en dehors de la mélodie jusqu'à ce que Lamproclès ait trouvé une meilleure manière de s'en servir, on ne peut douter que les autres modes, beaucoup meilleurs, ne dussent être employés comme gammes essentielles.

Pour qu'on pût s'y reconnaître, j'ai ajouté les noms donnés aux modes de plain-chant par Glaréanus; sa classification repose, il est vrai, sur une confusion des modes avec les gammes mineures grecques transposées, mais les termes en sont plus familiers aux musiciens que les vrais noms grecs. Au reste, je n'emploierai pas les termes de Glaréanus sans ajouter expressément qu'ils se rapportent à un mode du plain-chant; il vaudrait mieux la faire oublier. L'ancienne notation d'Ambrosius, au moyen de chiffres, était beaucoup plus judicieuse; mais comme ces chiffres ont aussi été changés et ne suffisent pas pour tous les modes, je me suis permis de proposer moi-même, dans le tableau ci-dessus, de nouvelles notations qui épargnent au lecteur la peine d'apprendre par cœur des noms grecs dont les uns, ceux de Glaréanus, sont certainement faux, et les autres ne valent peut-être guère mieux. Dans le nouveau système proposé, l'expression *mode de quarte d'ut* signifierait une gamme dont la tonique est *ut*, mais qui a la même armure à la clef que la gamme majeure obtenue en commençant par la quarte d'*ut*, c'est-à-dire *fa*. Il faut remarquer que par ces noms de septièmes, tierces, sixtes et secondes, il faut toujours entendre l'intervalle mineur; si nous avions pris l'intervalle majeur, la tonique ne serait pas comprise dans la gamme. Donc, le mode de tierce d'*ut* est la gamme de tonique *ut* qui a à la clef l'armure de *mi* ♭ majeur, parce que *mi* ♭ est la tierce mineure d'*ut*; c'est donc *ut* mineur, au moins dans la gamme descendante. J'espère que le lecteur, au moyen de cette notation, pourra voir toujours facilement ce dont il est question.

C'était là le système des gammes grecques pendant la période florissante de l'art, jusqu'au temps de la domination macédonienne. Dans l'antiquité, les airs de chant étaient compris dans un tétrachorde, comme encore maintenant beaucoup de mélodies de la liturgie romaine; plus tard elles embrassèrent l'étendue d'une octave. Aussi, pour le chant, n'avait-on pas besoin de gammes beaucoup plus étendues; on évitait d'employer les sons trop hauts et forcés ainsi que les sons graves sourds de la voix humaine; encore aujourd'hui les chants populaires des Grecs modernes présentent une étendue remarquablement faible (1).

Si donc Phrynis (vainqueur aux Panathénées, 457 ans avant J.-C.) faisait déjà usage de la cithare à neuf cordes, l'avantage le plus essentiel de cette disposition était de pouvoir passer d'un mode dans un autre.

(1) Weitzmann en a recueilli un certain nombre; *Histoire de la Musique grecque*. Berlin, 1855.

Plus tard, la gamme grecque, telle qu'elle se trouve pour la première fois au troisième siècle dans Euclide, embrasse deux octaves. Sa disposition est la suivante :

la...	Son surajouté	*Proslambanomenos.*		
si...	Tétrachorde grave	*Tetr. hypaton.*		
ut_1...				
$ré_1$...				
mi_1...				
fa_1...	Tétrachorde moyen	*Tetr. meson.*		
sol_1...				
la_1...			la_1...	Tétrachorde conjoint. *T. synemmenon.*
si_1...	Tétrachorde disjoint. *T. diezeugmenon*		$si\flat_1$...	
ut_2...			ut_2...	
$ré_2$...			$ré_2$...	
mi_2...				
fa_2...	Tétrachorde surnuméraire	*T. hyperbolaion*...		
sol_2...				
la_2...				

Nous avons donc ici d'abord la gamme hypodorienne à deux octaves, puis un tétrachorde ajouté qui, à côté du *si* de la première gamme, présente le *si* ♭, ce qui permet, pour employer l'expression moderne, de moduler de la tonique à la sous-dominante.

Cette gamme, qui, au fond, est une gamme mineure, fut transposée, et on obtint ainsi une nouvelle série correspondant aux diverses gammes mineures descendantes de la musique moderne ; mais on y transporta les anciens noms des modes, en donnant dans l'origine à chaque *ton* mineur le nom du *mode* compris dans la gamme mineure en question, entre les sons limites de la gamme hypodorienne. D'après la notation des Grecs, ces derniers doivent être écrits *fa* — *fa*. Mais, vraisemblablement, ils étaient plus bas d'une tierce. Ainsi, par exemple, le ton de *ré* mineur prenait le nom de lydien, parce que, dans cette

ré — *mi* — | *fa* — *sol* — *la* — *si*♭ — *ut* — *ré* — *mi* — *fa* — | *sol* — *la* — *si* — *ut* — *ré*,

gamme : la portion comprise entre les sons *fa* et *fa*, appartenait au mode lydien. Les anciens noms de *modes* changeaient donc leur significationpour celle de *tons*. Voici la liste de ces noms :

TABLEAU.

1° Hypodorien	= *fa*	mineur.
2° Hypo-ionique (hypophrygien grave).	= *fa♯*	—
3° Hypophrygien	= *sol*	—
4° Hypéolien (hypolydien grave)	= *sol♯*	—
5° Hypolydien	= *la*	—
6° Dorien	= *si♭*	—
7° Ionien (phrygien grave)	= *si*	—
8° Phrygien	= *ut*	—
9° Éolien (lydien grave)	= *ut♯*	mineur.
10° Lydien	= *ré*	—
11° Hyperdorien (mixolydien)	= *mi♭*	—
12° Hyperionien (mixolydien aigu)	= *mi*	—
13° Hyperphrygien (hypermixolydien).	= fa_1	— (addit. postérieure.)
14° Hyperéolien	= *fa♯*	— (addit. postérieure.)
15° Hyperlydien	= *sol♯*	— (addit. postérieure.)

Au moyen de chacune de ces gammes, on pouvait former chacun des anciens modes, en utilisant la portion correspondante. En outre, cette gamme permettait d'entrer dans le tétrachorde *synemmenon*, et, par suite, de moduler à la sous-dominante.

En faisant les essais de transposition qui ont servi de base à ces gammes, on reconnut qu'on pouvait considérer approximativement l'octave comme formée de douze demi-tons. Aristoxène savait déjà qu'en procédant par quintes, on revenait, au douzième degré de la série, à un son qui était, à peu près au moins, une des octaves supérieures du son initial. Par conséquent, dans la série :

fa — ut — sol — ré — la — mi — si — fa♯ — ut♯ — sol♯ — ré♯ — la♯ — mi♯

il identifiait le *mi♯* avec le *fa*, et terminait ainsi la série des sons engendrés par quintes. Les mathématiciens, il est vrai, repoussaient cette manière de voir, et ils avaient raison, en ce sens que, dans la série vraiment juste des quintes, le *mi♯* est un peu plus haut que le *fa*. Mais, dans la pratique, cette erreur était tout à fait inappréciable, et pouvait être négligée sans aucun scrupule, surtout dans la musique homophone.

La série des développements de la gamme grecque se trouve ainsi terminée. Mais si nous avons sur les formes extérieures, des notions assez complètes, nous ne connaissons que bien peu le fond des choses, parce que les mélodies qui nous sont parvenues comme exemples, sont en trop petit nombre et d'une origine trop douteuse.

Quoi qu'il en soit de la tonalité des gammes grecques, et bien que beaucoup de questions restent encore indécises sur ce sujet, nous trouvons ce dont nous avons besoin, pour la théorie du développement historique général des modes, dans les lois du plus ancien plain-chant, dont les origines se rattachent encore au système artistique de l'antiquité. Au quatrième siècle de notre ère, l'évêque Ambroise de Milan, institua pour le chant d'Église, quatre tons qui étaient, dans le système des gammes diatoniques non altérées :

1er ton. *ré — mi — fa — sol — la — si — ut — ré,* mode de septième.
2e ton. *mi — fa — sol — la — si — ut — ré — mi,* mode de sixte.
3e ton. *fa — sol — la — si — ut — ré — mi — fa,* mode de seconde (non mélodique).
4e ton. *sol — la — si — ut — ré — mi — fa — sol,* mode de quarte.

Mais, de même que dans les dernières gammes grecques, le son *si* était resté variable, et pouvait être remplacé par le *si*♭, on avait ainsi les quatre tons suivants :

1er. *ré — mi — fa — sol — la — si♭ — ut — ré,* mode de tierce (mineur).
2e. *mi — fa — sol — la — si♭ — ut — ré — mi,* mode de seconde (non mélodique).
3e. *fa — sol — la — si♭ — ut — ré — mi — fa,* mode majeur.
4e. *sol — la — si♭ — ut — ré — mi — fa — sol,* mode de septième.

On ne peut douter que ces gammes ambrosiennes ne doivent être considérées comme essentielles, car l'ancienne règle est de terminer en *ré,* en *mi*, en *fa*, en *sol*, les mélodies écrites dans la première, la seconde, la troisième et la quatrième gamme ; le son initial de chacune d'elles présente donc le caractère d'une tonique. Nous pouvons considérer cette règle donnée par Ambroise comme une simplification pratique, à l'usage de ses choristes, de l'ancienne théorie, surchargée d'une nomenclature illogique; nous avions donc raison de supposer, que les gammes analogues de l'apogée de la civilisation grecque pouvaient toutes être effectivement employées comme essentielles.

Le pape Grégoire le Grand intercala entre les gammes ambrosiennes un nombre égal de gammes accidentelles, celles dites *plagales*, allant de la quinte à la douzième de la tonique. Par opposition, les ambrosiennes étaient appelées *authentiques.* L'existence de ces gammes plagales dans la musique d'Église, ne fit qu'augmenter le chaos qui régnait à la fin du moyen âge dans le plain-chant, au moment où les compositeurs commençaient à négliger les anciennes règles sur la position du son final ; et ce chaos même servit à favoriser un développement plus libre du système musical. On voit aussi, d'ailleurs, comme nous l'avons remarqué dans le précédent chapitre, que le sentiment de la prépondérance de la tonique n'était pas encore très-développé au moyen âge ; cependant, par rapport aux écrivains grecs, on avait fait au moins le progrès de reconnaître comme règle, sinon d'observer d'une manière constante, la loi de la terminaison sur la tonique.

En 1547, Glaréanus, dans son *Dodécachordon*, chercha à rétablir dans sa pureté la théorie des tons. Il prouva, par l'étude des compositions musicales de ses contemporains, qu'il fallait distinguer non 4,

mais 6 gammes authentiques qu'il décora des noms grecs donnés plus haut. A cela, il ajouta 6 gammes plagales, et distingua en tout douze tons, d'où vient le titre de son livre. Par conséquent, encore au seizième siècle, on rassemblait, dans une même série, des gammes essentielles et accidentelles. Parmi les tons de Glaréanus, il y en a encore un, non mélodique, pour le mode de quinte, et qu'il appelle mode lydien. Les exemples de ce mode font défaut, comme Winterfeld s'en est assuré dans une étude approfondie de la musique du moyen âge (1), ce qui paraît confirmer le jugement de Platon sur le mixolydien et le syntonolydien.

Il ne reste donc, comme modes mélodiques, employés rigoureusement dans le chant homophone et polyphone, que les cinq qui suivent :

	NOTATION PROPOSÉE.	NOTATION GRECQUE.	D'APRÈS GLARÉANUS.	GAMMES.
1.	Majeur.	Lydien.	Ionien.	*ut*—ut_1
2.	Mode de quarte.	Ionien.	Mixolydien.	*sol*—sol_1
3.	Mode de septième.	Phrygien.	Dorien.	*ré*—$ré_1$
4.	Mode de tierce.	Éolien.	Éolien.	*la*—la_1
5.	Mode de sixte.	Dorien.	Phrygien.	*mi*—mi_1

Tel est le développement historique de ces modes, issus de la série des quintes. Or, cette dernière n'établit aucune relation entre les sons fournis par elle, et une tonique particulière quelconque. Nous avons même vu, que les modes grecs et les gammes du plain-chant tiraient leur origine de ce qu'on pouvait prendre, pour point de départ, un son quelconque de la gamme diatonique.

Néanmoins, si telle est l'origine historique de la gamme diatonique, son existence ne peut être encore expliquée ainsi. On peut accorder un instrument suivant une suite de quintes, indéfiniment prolongées, mais il est impossible au chanteur ou à l'auditeur, dans le passage d'un *ut* à un *mi*, de sentir que ce dernier son est séparé du premier par quatre intervalles de quinte. Même dans la relation du second degré par quintes, de l'*ut* au *ré*, il est douteux que l'auditeur sente le lien des deux sons. On peut ici, il est vrai, entre les deux

(1) Winterfeld, *J. Gabrielli et son temps*. Berlin, 1834, vol. I, p. 73 à 108.

sons, intercaler par la pensée un *sol* muet, quarte inférieure d'*ut*, quinte inférieure de *ré*, et établir ainsi la liaison, sinon pour l'oreille physique, au moins pour la mémoire. On pourrait peut-être comprendre ainsi, comment Rameau et d'Alembert expliquent le passage de l'*ut* au *ré* au moyen d'une basse fondamentale *pensée* par le chanteur. Comme ce dernier n'entend pas la basse *sol* en même temps que son *ré*, il ne peut émettre cette note de manière qu'elle forme une consonnance avec le *sol;* mais il peut faciliter le passage mélodique en pensant ainsi à un son intermédiaire. C'est là, comme on sait, un moyen souvent avantageux pour arriver à prendre un intervalle difficile. En revanche, ce moyen est naturellement impraticable quand il s'agit de sons plus éloignés l'un de l'autre dans la série des quintes.

Enfin, dans cette série, il n'y a aucune raison de s'arrêter lorsque la gamme diatonique est remplie. Pourquoi ne pas arriver à la gamme chromatique à 12 demi-tons? Pourquoi cette inégalité singulière entre les degrés

$$1,\ 1,\ \frac{1}{2},\ 1,\ 1,\ 1,\ \frac{1}{2},$$

par lesquels nous terminons notre gamme? La série prolongée des quintes n'aurait pas donné des intervalles plus petits que ceux qui existent déjà. Il paraît que l'ancienne gamme à cinq sons proscrivait les demi-tons comme intervalles trop faibles. Mais pourquoi ne pas les admettre tous quand on en a déjà deux?

Nous avons déjà expliqué, à propos de la gamme à cinq sons, comment la série des quintes qu'on pouvait obtenir sur les instruments, avait probablement fourni la première occasion d'apprendre à connaître les sons reliés au son fondamental par une faible relation du premier degré. Le sentiment d'une parenté aussi faible pouvait être insuffisant pour servir, à lui tout seul, à trouver immédiatement un nouveau degré de l'échelle des sons. Mais, si, grâce à un instrument bien accordé, le musicien avait plus souvent l'occasion d'entendre après la tonique des tierces et des sixtes, bien que non tout à fait justes, et de comparer cette suite de sons avec celle formée de secondes ou de septièmes majeures ou mineures, son oreille pouvait s'exercer peu à peu à comprendre et à reconnaître la parenté plus étroite des intervalles en question.

Nous allons maintenant voir, quelle gamme nous obtenons en prolongeant la relation naturelle entre les sons, plus loin qu'on ne l'a fait dans la première construction des gammes diatoniques. Nous appellerons *affinité du premier degré, celle où les sons ont deux sons partiels communs ; affinité du second degré, celle de deux sons qui ont*

avec un troisième une relation du 1er degré. Plus est grande l'intensité relative des deux sons partiels communs par rapport aux autres, dans une relation du premier degré, et plus étroite est la parenté, plus les chanteurs et les auditeurs sentiront facilement ce que les deux sons en relation présentent de commun. Il en résulte que le sentiment de l'affinité des sons doit varier avec le timbre, et je crois qu'on peut en effet l'affirmer ; les morceaux joués sur la flûte et les registres doux de l'orgue, où les assemblages de sons manquent de caractère par suite du défaut d'harmoniques et de dissonnances tranchées, présentent quelque chose d'analogue aux mélodies simples. Cela tient, à mon avis, à ce que, dans les timbres en question, les intervalles naturels des tierces et des sixtes, peut-être même des quartes et des quintes, n'ont pas leur raison d'être dans la sensation immédiate de l'auditeur, qui, dans ce cas, ne perçoit les affinités sonores que par une opération de la mémoire. Quand l'auditeur sait que, sur les autres instruments et dans le chant, les tierces et les sixtes se présentent comme des sons naturellement reliés par une relation directe, il peut admettre que les mêmes affinités existent, lorsque les mêmes sons viennent à être émis par une flûte ou les registres doux de l'orgue. Néanmoins, une impression qui n'existe que dans la mémoire ne peut avoir la même fraîcheur, la même vivacité qu'une sensation immédiate.

La relation est d'autant plus étroite que les sons partiels identiques sont plus intenses, et, comme, en général, les harmoniques dont le numéro d'ordre est élevé, sont moins forts que ceux qui les précèdent dans la série, il en résulte que l'affinité de deux sons est ordinairement d'autant plus faible que le numéro d'ordre des sons partiels communs est plus élevé. Or, le lecteur se rappellera que, d'après la théorie des intervalles consonnants, les numéros d'ordre donnent en même temps le rapport des nombres de vibrations des deux notes considérées.

Je donne ci-dessous un tableau qui présente, dans la ligne horizontale supérieure, les numéros d'ordre des sons partiels de la tonique ut_1, et dans la première colonne verticale, ceux correspondant au son considéré. A la rencontre des lignes horizontales et verticales, se trouve indiqué le son de la gamme pour lequel la coïncidence des sons partiels a lieu. Seulement on n'a considéré que les sons éloignés de la tonique de moins d'une octave. A chaque degré sont les deux numéros d'ordre des sons partiels communs, pour donner une mesure de la force de l'affinité.

	SONS PARTIELS DE LA TONIQUE.					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1.	ut_1 1.1	ut_2 1.2				
2.	*ut* 2.1	ut_1 2.2	sol_1 2.3	ut_2 2.4		
3.		*fa* 3.2	ut_1 3.3	fa_1 3.4	la_1 3.5	ut_2 3.6
4.		*ut* 4.2	*sol* 4.3	ut_1 4.4	mi_1 4.5	sol_1 4.6
5.			*mi♭* 5.3	*la♭* 5.4	ut_1 5.5	$mi♭_1$ 5.6
6.			*ut* 6.3	*fa* 6.4	*la* 6.5	ut_1 6.6

D'après cette classification systématique, nous trouvons, dans l'octave au-dessus du son fondamental ut_1, une suite de sons, en relation du premier degré avec la tonique, rangés par ordre d'affinité :

$$\begin{matrix} ut_1, & ut_2, & sol_1, & fa_1, & la_1, & mi_1, & mi\flat_1, \\ 1:1 & 1:2 & 2:3 & 3:4 & 3:5 & 4:5 & 5:6; \end{matrix}$$

dans l'octave descendante, la série suivante :

$$\begin{matrix} ut_1, & ut_0, & fa_0, & sol_0, & mi\flat_0, & la\flat_0, & la_0, \\ 1:1 & 1:2 & 3:2 & 4:3 & 5:3 & 5:4 & 6:5. \end{matrix}$$

L'interruption de la série se trouve motivée par la petitesse des intervalles fournis. Ceux-ci doivent être assez grands pour qu'il ne soit pas difficile de les émettre ou de les distinguer. Quant à la limite inférieure qu'ils peuvent atteindre dans la gamme, c'est une question que les diverses nations ont résolue différemment suivant leurs goûts, et peut-être aussi suivant la finesse de leur oreille. Dans l'origine, les Chinois et les Gaëls admettaient comme limite le ton, les Grecs le demi-ton. Ceux-ci ont trouvé le quart de ton dans leur système enharmonique, mais ils l'ont rejeté plus tard. En revanche, les Asiatiques admettent, dit-on, encore aujourd'hui le tiers et le quart de ton. Les Européens ont adopté la division des Grecs, et ont pris pour limite le demi-ton $\frac{16}{15}$. L'intervalle entre le *mi* ♭ et le *mi*, ainsi qu'entre le *la*♭ et le *la*, est plus faible ; il est de $\frac{25}{24}$; aussi, devons-nous éviter de mettre le *mi* et le *mi*♭, le *la*♭ et le *la* dans la même gamme. Nous ob-

tenons donc les deux séries suivantes des sons présentant les relations les plus étroites, dans la gamme montante et descendante :

En montant....... $ut_1 — mi_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — ut_2$

$$\frac{5}{4} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{6}{5}.$$

En descendant..... $ut_1 — la\flat_0 — sol_0 — fa_0 — mi\flat_0 — ut_0$

$$\frac{5}{4} \quad \frac{16}{16} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{6}{5}.$$

Les nombres placés au-dessous indiquent les distances entre deux degrés consécutifs. Nous remarquons que les intervalles qui avoisinent immédiatement la tonique sont trop grands, et peuvent encore être subdivisés. Mais la série des alliés du premier degré étant complète, cette subdivision n'est plus possible qu'au moyen des alliés du second degré.

Les affinités du second degré les plus fortes sont naturellement obtenues par l'intervention des plus proches alliés de la tonique. Au premier rang de ceux-ci est l'octave. Les alliés de l'octave ne sont pas exactement les mêmes que ceux de la tonique elle-même ; mais, en combinant l'octave et la tonique, on obtient la série descendante des intervalles, là où on avait la série ascendante, et réciproquement.

Donc, en montant à partir d'ut_1, nous avions trouvé les intervalles de notre gamme majeure :

$$ut_1 — mi_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — ut_2.$$

Nous pouvons aussi prendre les alliés de ut_2 qui sont :

$$ut_1 — mi\flat_1 — fa_1 — sol_1 — la\flat_1 — ut_2.$$

Nous pouvons donc, par la relation du second degré, obtenir les sons de la gamme mineure ascendante. Parmi ces derniers, le $mi\flat_1$ est donné ici comme sixte majeure inférieure de ut_2 ; mais il a aussi avec ut_1 la faible affinité donnée par le rapport 5 : 6. Nous avons vu que le sixième son partiel existe encore nettement dans beaucoup de timbres où manquent le septième et le huitième, par exemple sur le piano, dans les petits tuyaux de l'orgue et dans les jeux de fourniture. Le rapport 5 : 6 peut donc souvent devenir appréciable comme relation naturelle du premier degré ; c'est plus difficile au contraire pour le rapport $ut_1 — la\flat_1$ ou 5 : 8. Il s'ensuit que, dans la gamme ascendante, nous pouvons plutôt changer mi_1 en $mi\flat_1$ que la_1 en $la\flat_1$. Dans ce dernier cas, il ne subsiste plus que l'affinité du second degré.

Par conséquent, les trois gammes ascendantes qui s'expliquent le mieux sont les suivantes :

$$ut_1 — mi_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — ut_2$$
$$ut_1 — mi\flat_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — ut_2$$
$$ut_1 — mi\flat_1 — fa_1 — sol_1 — la\flat_1 — ut_2.$$

Ces différences, qui reposent sur une relation du second degré par l'octave, sont très-faibles. Elles ont leur valeur, néanmoins, dans la formation connue de la gamme mineure ascendante où elles se présentent.

En descendant, à partir de ut_1, on peut, au lieu des alliés du premier degré dans la série :

$$ut_1 — la\flat_0 — sol_0 — fa_0 — mi\flat_0 — ut_0,$$

prendre aussi les alliés de l'ut_0 :

$$ut_1 — la_0 — sol_0 — fa_0 — mi_0 — ut_0.$$

Dans cette dernière gamme, le la_1 est relié au point de départ ut_1 par la faible affinité du premier degré 5 : 6, et le *mi* seulement par celle du second degré. On peut donc former encore les trois gammes :

$$ut_1 — la — sol — fa — mi\flat — ut,$$

que nous avons trouvées en montant. Pour les gammes descendantes, nous avons les séries :

$$ut_1 — la\flat — sol — fa — mi\flat — ut$$
$$ut_1 — la — sol — fa — mi\flat — ut$$
$$ut_1 — la — sol — fa — mi — ut.$$

D'une manière générale, de même que toutes les octaves de la tonique, éloignées ou voisines, aiguës ou graves, sont avec elle en relation si étroite, qu'elles peuvent presque être identifiées avec elle, de même aussi, les octaves de chacun des degrés ont, avec la tonique, une parenté presque du même ordre que les sons de même nom les plus voisins de la tonique.

Après l'octave, les alliés les plus proches de l'ut_1 sont la quinte supérieure sol_1 et la quinte inférieure fa_0. Leurs propres alliés doivent donc entrer d'abord en considération dans la formation de la gamme. Prenons d'abord les alliés du *sol.*

GAMME ASCENDANTE :

Alliés de ut_1... ut_1 ——— mi_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — ut_2,
Alliés de sol_1... ut_1 — $ré_1$ — $mi\flat_1$ —— sol_1 —— si_1—ut_2,

dont la combinaison donne :

1° *La gamme majeure* (mode lydien des Grecs) :

$$ut_1 — ré_1 — mi_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — si_1 — ut_2,$$
$$1 \quad \frac{9}{8} — \frac{5}{4} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{15}{8} \quad 2.$$

Le changement du mi_1 en $mi\flat_1$ est ici facilité encore par l'affinité avec le sol_1. Cela donne :

2° *La gamme mineure ascendante :*

$$ut_1 — ré_1 — mi\flat_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — si_1 — ut_2,$$
$$1 — \frac{9}{8} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{15}{8} \quad 2.$$

GAMME DESCENDANTE :

Alliés de ut_1... ut_1 —— $la\flat_0$ — sol_0 — fa_0 — $mi\flat_0$ ——— ut_0,
Alliés de sol.... ut_1 — $si_0\flat$ —— sol_0 ——— $mi\flat_0$ — $ré_0$ — ut_0,

d'où :

3° *La gamme mineure descendante* (mode hypodorien ou éolien des Grecs. — Mode de tierce) :

$$ut_1 — si\flat_0 — la\flat_0 — sol_0 — fa_0 — mi\flat_0 — ré_0 — ut_0,$$
$$2 \quad \frac{9}{5} \quad \frac{8}{5} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{9}{8} — 1,$$

ou, dans la gamme mixte qui change $la\flat$ en la :

4° *Mode de septième* (phrygien des Grecs) :

$$ut_1 — si_0\flat — la_0 — sol_0 — fa_0 — mi_0\flat — ré_0 — ut_0,$$
$$2 \quad \frac{9}{5} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{9}{8} \quad 1.$$

Prenons maintenant les alliés de la quinte inférieure fa, nous trouvons les gammes suivantes :

EN MONTANT :

Alliés de l'ut_1... ut_1 —— mi_1 — fa_1 — sol_1 — la_1 — ut_2
Alliés de fa..... ut_1 — $ré_1$ —— fa_1 ——— la_1—$si\flat_1$—ut_2

ce qui donne :

5° *Mode de quarte* (hypophrygien ou ionien des Grecs) :

$$ut_1 - ré_1 - mi_1 - fa_1 - sol_1 - la_1 - si\flat_1 - ut_2$$
$$1 \quad \frac{10}{9} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{16}{9} \quad 2.$$

Changeons mi_1 en $mi\flat_1$, nous retrouvons :

6° *Mode de septième*, mais avec d'autres déterminations pour les sons intercalaires $ré_1$ et $si\flat_1$:

$$ut_1 - ré_1 - mi\flat_1 - fa_1 - sol_1 - la_1 - si\flat_1 - ut_2,$$
$$1 \quad \frac{10}{9} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{16}{9} \quad 2.$$

GAMMES DESCENDANTES :

Alliés d'ut_1.... ut_1 ———— $la\flat$ — sol — fa — $mi\flat$ — ut,
Alliés de fa.... ut_1 — $si\flat$ — la ———— fa ———— $ré\flat$—ut

d'où :

7° *Mode de sixte* (dorien des Grecs) :

$$ut_1 - si\flat_0 - la\flat_0 - sol_0 - fa_0 - mi\flat_0 - ré\flat_0 - ut_0,$$
$$2 \quad \frac{16}{9} \quad \frac{8}{5} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{16}{15} \quad 1.$$

Voilà donc les modes mélodiques des Grecs et de l'ancienne Église chrétienne, tous retrouvés ici par la voie naturelle de la déduction logique. Par le fait, tous ces modes sont également justifiés, tant qu'il ne s'agit que de chant homophone.

J'ai d'abord donné ici les gammes telles qu'on peut les déduire de la manière la plus naturelle. Mais, comme nous avons vu que chacune des trois gammes

$$ut_1 - mi_1 - fa_1 - sol_1 - la_1 - ut_2,$$
$$ut_1 - mi\flat_1 - fa_1 - sol_1 - la_1 - ut_2,$$
$$ut_1 - mi\flat_1 - fa_1 - sol_1 - la\flat_1 - ut_2$$

peut être prise aussi bien en montant qu'en descendant, si la première s'adapte mieux au mouvement ascendant et la dernière au mouvement descendant, on peut combler les lacunes de chacune d'elles au moyen des alliés du sol_1 ou du *fa*, et même, certains vides par un allié du *fa*, d'autres par un allié du *sol*.

Les valeurs numériques des alliés directs de la tonique sont naturellement fixes (1) et invariables, parce qu'elles sont directement

(1) Je ne peux pas admettre, comme le veut Hauptmann, que, dans la gamme mineure ascendante, se trouve le *la* pythagoricien, la quinte du *ré*. D'Alembert veut mettre le

fournies par les rapports consonnants avec la tonique, et par suite, déterminées plus sûrement que par toute autre relation plus éloignée. En revanche, les sons complémentaires dont l'affinité n'est que du second degré ne sont pas donnés d'une manière aussi précise.

Pour les secondes, nous avons, en posant $ut_1 = 1$:

1° Le *ré* allié du *sol* $= \frac{9}{8}$;

2° Le *ré* allié du *fa* $= \frac{10}{9} = \frac{9}{8} \times \frac{80}{81}$;

3° Le *ré♭* allié du *fa* $= \frac{16}{15}$;

Pour les septièmes :

1° Le *si* allié du *sol* $= \frac{15}{8}$;

2° Le *si♭* allié du *sol* $= \frac{9}{5}$;

2° Le *si♭* allié du *fa* $= \frac{16}{9} = \frac{9}{5} \times \frac{80}{81}$.

Tandis que le *si* et le *ré♭* sont donnés d'une manière certaine, le *si♭* et le *ré* restent indéterminés. Tous deux peuvent former avec la tonique *ut*, un ton majeur $\frac{9}{8}$, ou un ton mineur $\frac{10}{9}$.

Pour pouvoir désigner d'une manière précise et sans équivoque ces différences de ton, nous allons faire usage d'une notation nouvelle qui, comme celle d'Hauptmann (1), employée dans l'édition allemande de mon livre, permettra de distinguer les sons obtenus par une série de quintes, de ceux fournis par l'affinité de la tierce avec la tonique. Nous avons déjà vu que ces deux modes de détermination donnent des hauteurs un peu différentes, et que les résultats doivent rester distincts dans des recherches théoriques, bien que la pratique musicale moderne les confonde ordinairement. — Nous désignerons par :

ut, *sol*, *ré*, *la*, *mi*, etc.

une série de quintes justes ; par

$\overline{ut}$, $\overline{sol}$, $\overline{ré}$, $\overline{la}$, $\overline{mi}$, etc.

les sons plus élevés de $\frac{81}{80}$, c'est-à-dire d'un intervalle qu'on appelle un *comma*, que ceux de la série précédente, et par

$\underline{ut}$, $\underline{sol}$, $\underline{ré}$, $\underline{la}$, $\underline{mi}$, etc.

ceux plus graves de la même quantité.

même son dans la gamme majeure quand il passe du *sol* au *si*, par l'intermédiaire de la base fondamentale *ré*. Ce serait là une modulation en *sol majeur* bien caractérisée, qui n'est pas nécessaire, si on détermine les rapports naturels des sons avec la tonique. Voir Hauptmann, *Harmonik und Metrik*, p. 60.

(1) *Natur der Harmonik und Metrik*, Leipzig, 1853. — Je ne puis que m'associer au regret exprimé par Naumann, que les aperçus ingénieux dont cet ouvrage abonde, soient enfouis derrière l'abstruse terminologie de la dialectique hégélienne, et deviennent par là inabordables à une nombreuse catégorie de lecteurs.

Un son, plus élevé ou plus bas de deux *commas* que le terme correspondant de la série des quintes, sera désigné par $\overline{\overline{ut}}$ ou $\underline{\underline{ut}}$, etc..

Dans ce système, l'accord majeur dont les intervalles sont exprimés par les nombres

$$1,\ \frac{5}{4},\ \frac{3}{2}$$

est représenté par

$$ut,\ \underline{mi},\ sol,$$

la tierce naturelle étant inférieure de $\frac{81}{80}$ à la tierce obtenue par quintes :

$$\frac{5}{4} = \frac{81}{64} \times \frac{80}{81}.$$

Il pourrait encore s'écrire:

$$\overline{ut},\ mi,\ \overline{sol},$$

l'intervalle *mi* $\overline{ut}$ étant exprimée par

$$\frac{81}{64} : 1 \times \frac{81}{80} = \frac{80}{64} = \frac{5}{4},$$

et $\overline{sol}$ *mi*, par

$$\frac{3}{2} \times \frac{81}{80} : \frac{81}{64} = \frac{6}{5}, \text{ ou une tierce mineure,}$$

ou bien par

$$\underline{ut},\ \underline{\underline{mi}},\ \underline{sol}.$$

L'accord parfait mineur, exprimé par les nombres

$$1,\ \frac{6}{5},\ \frac{3}{2},$$

sera représenté par

$$ut,\ \overline{mi\flat},\ sol;$$

la tierce mineure naturelle $\overline{mi\flat}$ *ut*, égale à $\frac{6}{5}$ est supérieure d'un comma à la tierce mineure obtenue par quintes $\frac{32}{27}$; $\frac{6}{5} = \frac{32}{27} \times \frac{81}{80}$.

Les trois séries des alliés immédiats de l'*ut*, doivent donc s'écrire :

$$ut - \underline{\underline{mi}} - fa - sol - \underline{la} - ut_1$$
$$ut - mi\flat - fa - sol - \underline{\underline{la}} - ut_1$$
$$ut - \overline{mi\flat} - fa - sol - \overline{la\flat} - ut_1$$

et les sons complémentaires sont : entre la tonique et la tierce : *ré*, $\underline{\textit{ré}}$ ou $\overline{\textit{ré}}\flat$; entre la sixte et l'octave : *si, si*♭ ou $\overline{\textit{si}}\flat$.

Par conséquent, les modes mélodiques de la musique grecque et du plain-chant chrétien donnent les gammes suivantes :

1° Mode majeur :

$$\textit{ut} — \textit{ré} — \underline{\textit{mi}} — \textit{fa} — \textit{sol} — \underline{\textit{la}} — \underline{\textit{si}} — \textit{ut}_1 ;$$
$$(\underline{\textit{ré}})$$

2° Mode de quarte :

$$\textit{ut} — \textit{ré} — \underline{\textit{mi}\flat} — \textit{fa} — \textit{sol} — \underline{\textit{la}} — \textit{si}\flat — \textit{ut}_1 ;$$
$$(\underline{\textit{ré}}) \qquad (\overline{\textit{si}\flat})$$

3° Mode de septième :

$$\textit{ut} — \textit{ré} — \textit{mi}\flat — \textit{fa} — \textit{sol} — \underline{\textit{la}} — \textit{si}\flat — \textit{ut}_1 .$$
$$(\underline{\textit{ré}}) \qquad (\overline{\textit{si}\flat})$$

4° Mode de tierce :

$$\textit{ut} — \textit{ré} — \overline{\textit{mi}\flat} — \textit{fa} — \textit{sol} — \overline{\textit{la}\flat} — \textit{si}\flat — \textit{ut}_1 .$$
$$(\underline{\textit{ré}}) \qquad (\overline{\textit{si}\flat})$$

5° Mode de sixte :

$$\overline{\textit{ut}} — \overline{\textit{ré}\flat} — \textit{mi}\flat — \textit{fa} — \textit{sol} — \overline{\textit{la}\flat} — \textit{si}\flat — \textit{ut}_1 .$$
$$(\overline{\textit{si}\flat})$$

Dans ce mode de notation, par conséquent, la hauteur des sons est exprimée d'une manière précise, par la détermination de la nature de la consonnance formée par la tonique et ses alliés.

Les mêmes gammes, dans l'ancien système grec de Pythagore, devraient d'ailleurs s'écrire :

Mode majeur :

$$\textit{ut} — \textit{ré} — \textit{mi} — \textit{fa} — \textit{sol} — \textit{la} — \textit{si} — \textit{ut}_1 ,$$

et ainsi des autres.

Dans cette manière d'écrire les modes diatoniques, la hauteur de la seconde et celle de la septième reste en partie indéterminées. Dans ce cas, j'ai placé le *ré* avant le $\underline{\textit{ré}}$ et le *si*♭ avant le $\overline{\textit{si}}\flat$, parce que l'affinité est plus grande dans les quintes que dans les tierces. Or, *si*♭ et

ré sont en rapport de quinte avec *fa* et *sol*, alliés directs de la tonique, tandis que *ré* et *si*♭ ne sont qu'en rapport de tierce. Ce n'est pourtant pas une raison suffisante pour exclure absolument ces dernières notes du chant homophone. Car, si, dans le mouvement mélodique, la seconde du ton arrive dans le voisinage des alliés du *fa*, par exemple entre le *fa* et le *la*, ou immédiatement après, il sera certainement plus naturel pour un chanteur ayant une bonne intonation, de donner le *ré* directement allié au *fa* et au *la*, que le *ré* qui n'a, avec ces derniers, qu'une relation du troisième degré. La parenté plus étroite de ce *ré* avec la tonique peut ici à peine décider la question.

Je ne pense pas non plus, que cette incertitude entre les sons complémentaires soit un défaut du système musical, car, dans la gamme mineure moderne, la sixte et la septième peuvent varier non-seulement d'un comma, mais d'un demi-ton, suivant le sens du mouvement mélodique. Nous apprendrons d'ailleurs, dans le chapitre suivant, à connaître des raisons plus décisives pour choisir entre le *ré* et le *ré*, lorsque nous passerons de la musique homophone à l'influence de l'harmonie sur les gammes.

Nous avons vu plus haut que la vraie valeur de la tierce majeure $\frac{5}{4}$ avait été trouvée et fixée pour la première fois par Archytas dans le mode enharmonique. La série des quintes s'y trouvait interrompue, et il n'y avait par conséquent aucune raison de préférer aux autres les sons qu'elle fournit. La véritable valeur de la tierce mineure $\frac{6}{5}$ fut trouvée par Érastothènes (troisième siècle avant Jésus-Christ), pour le mode chromatique. Enfin Didymus, au premier siècle de notre ère, introduisit les véritables rapports numériques dans le tétrachorde diatonique. Il divise ainsi le tétrachorde :

Enharmonique...	$\frac{32}{31}$	$\frac{31}{30}$	$\frac{5}{4}$,
Chromatique.....	$\frac{16}{15}$	$\frac{25}{24}$	$\frac{6}{4}$,
Diatonique......	$\frac{16}{15}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$.

Ce dernier correspond, dans notre notation, à la succession suivante :

si — *ut* — *ré* — *mi*,

$\frac{16}{15}$ $\frac{10}{9}$ $\frac{9}{8}$.

Ptolémée, au contraire, dispose autrement le tétrachorde diatonique :

$$\underline{si} \;-\; ut \;-\; ré \;-\; \underline{mi}$$
$$\frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9},$$

en sorte qu'ici déjà nous trouvons pour la place des deux espèces de tons, l'incertitude que nous avons constatée plus haut dans la construction de la gamme diatonique naturelle. Le même Ptolémée établit, à côté de ce tétrachorde naturel, qu'il appela mode syntonique, encore deux autres divisions tout à fait arbitraires, savoir :

Diatonique doux........	$\frac{21}{20}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{8}{7}$,
Diatonique égal.........	$\frac{12}{11}$	$\frac{11}{10}$	$\frac{10}{9}$;

en sorte qu'il ne semble pas que les anciens Grecs aient eu un sentiment bien vif des avantages du mode syntonique. Aussi, les interprètes modernes de la théorie musicale grecque ont-ils généralement émis l'opinion que ces différences de hauteur, appelées *timbres* (χροαι) chez les Grecs, n'étaient que des spéculations théoriques qui n'étaient jamais entrées dans l'application (1). Ils supposent que ces différences sont si faibles, qu'il faudrait une éducation incroyablement raffinée de l'oreille, pour en apprécier l'effet esthétique. Je prétends, au contraire, que cette opinion des modernes théoriciens ne peut avoir pris naissance que parce qu'aucun d'entre eux n'a cherché à réaliser dans la pratique ces différents modes, et à les comparer au moyen de l'oreille. Au moyen d'un harmonium qui sera décrit plus bas, je puis comparer la gamme naturelle avec la gamme pythagoricienne et exécuter le mode diatonique, tantôt à la manière de Didyme, tantôt à celle de Ptolémée, ou produire même encore d'autres modifications. Il n'est pas du tout difficile d'apprécier une différence d'un comma $\frac{81}{80}$ entre les sons, quand on exécute des airs connus dans les différents *timbres*, et tous les musiciens devant lesquels j'ai fait l'expérience ont immédiatement reconnu la différence. Les passages mélodiques en tierces pythagoriciennes présentent une dureté, provoquent un sentiment de malaise, qui, avec les tierces naturelles, se changent en une impression d'harmonie, de pureté, de douceur. Et pourtant, la gamme tempérée, à

(1) Bellermann, *Gammes grecques*, p. 27. Westphal, dans ses *Fragments de Rhythmique grecque*, p. 209, a rassemblé des passages d'auteurs grecs, qui montrent le véritable usage de la pratique. D'après Plutarque, *De Musicâ*, p. 38 et 39, les Grecs ont même fini par avoir une préférence pour les intervalles de la gamme syntonique.

laquelle nous sommes habitués, a des tierces plus voisines des tierces pythagoriciennes que des tierces naturelles, auxquelles nous sommes, par conséquent, moins accoutumés. En outre, en ce qui concerne la finesse du sentiment des choses artistiques, nous devons, nous autres modernes, considérer les Grecs comme des modèles qui n'ont jamais été surpassés. Dans le sujet qui nous occupe notamment, ils avaient des occasions toutes particulières de donner par l'éducation à leur oreille plus de finesse que nous. Nous sommes habitués, dès la jeunesse, à nous accommoder de la fausseté du système tempéré, et toute l'ancienne multiplicité des modes d'expression diverse s'est réduite à la distinction, assez facile à faire, du majeur et du mineur. Les différents degrés d'expression que nous trouvons aujourd'hui dans les accords et les modulations, les Grecs et les autres peuples qui n'ont admis que la musique homophone, devaient chercher à les atteindre par une disposition plus fine et plus variée des modes. Qu'y a-t-il donc d'étonnant à ce que leur oreille fût beaucoup plus délicate que la nôtre pour des nuances de ce genre?

Ces différences entre le système naturel et le système pythagoricien, ont été utilisées d'une manière encore plus logique, plus méthodique dans la musique arabe-persane, dont les propriétés, à ce qu'il paraît, étaient déjà mises à profit sous le règne des Sassanides, avant la conquête arabe. Pour se faire une idée exacte du système de cette musique qui a été mal compris jusqu'ici, il faut encore savoir ce qui suit. Si, à partir de l'*ut*, on monte de quatre quintes :

$$ut - sol - ré_1 - la_1 - mi_2,$$

on arrive à un *mi* plus élevé d'un comma $\frac{81}{80}$ que la tierce majeure naturelle de l'*ut*, que nous désignons par $\underline{mi}_2$. Ce *mi* forme la tierce dans la gamme pythagoricienne. Si, au contraire, à partir d'*ut* nous descendons de 8 quintes :

$$ut - fa - si\flat - mi\flat - la\flat - ré\flat - sol\flat - ut\flat - fa\flat,$$

on arrive à un $fa\flat$ qui coïncide presque exactement avec le $\underline{mi}$ naturel. L'intervalle d'*ut* à $fa\flat$ est exprimé en effet par le rapport numérique

$$\frac{8192}{6561} \text{ ou environ } \frac{221}{177} = \frac{5}{4} \cdot \frac{884}{885}.$$

Le son $fa\flat$ est donc plus bas que la tierce naturelle $\underline{mi}$ d'un très-petit intervalle $\frac{885}{884}$, environ la onzième partie d'un comma. Cette

différence entre le *fa*♭ et le $\underline{mi}$ est à peine sensible dans la pratique, si ce n'est par l'observation très-précise des battements très-lents que fait l'accord *ut–fa*♭*–sol* sur un instrument tout à fait juste ; nous pouvons donc, dans la pratique, identifier absolument le *fa*♭ et le $\underline{mi}$, ainsi que leurs quintes respectives *ut*♭ = $\underline{si}$, *sol*♭ = $\underline{fa♯}$, etc..

Dans la gamme persico-arabe, l'octave est partagée en dix-sept parties, au lieu des six tons que présente notre système de tempérament égal ; c'est ce qui a fait croire aux interprètes modernes, que chacun des degrés de la gamme persane valait environ un tiers du ton de la nôtre. S'il en était ainsi, cette division serait tout à fait différente de la nôtre, et la musique arabe ne pourrait être exécutée par nos instruments. Or je trouve dans un écrit de Kiesewetter sur la musique des Arabes (1), qui a été composé avec le concours philologique de l'éminent orientaliste de Hammer-Purgstall, la traduction des préceptes qu'Abdul Kadir, Persan distingué du quatorzième siècle de notre ère, qui vivait à la cour de Timur et de Bajazet, a donnés sur la division du monochorde, et desquels se déduit le système des gammes orientales avec la plus grande précision, la plus grande sûreté. Ces préceptes s'accordent d'ailleurs complétement dans leur ensemble avec les règles posées longtemps auparavant par Farabi (2) († 950) et, à peu près à la même époque († 1315), par Mahmud Schirasi (3), pour la division de la touche du luth. D'après Abdul Kadir, tous les degrés de la gamme arabe sont fournis par une série de seize quintes et sont les suivants, en appelant *ut* le son initial et en faisant usage de notre notation :

ut — *ré*♭ — $\underline{ré}$ ‿ *ré* — *mi*♭ — $\underline{mi}$ ‿ *mi* — *fa* — *sol*♭
1 2 $\overline{3}$ 4 5 $\overline{6}$ 7 8 9

— $\underline{sol}$ ‿ *sol* — *la*♭ — $\underline{la}$ ‿ *la* — *si*♭ — $\underline{si}$ — $\underline{ut}$ ‿ *ut*.
$\overline{10}$ 11 12 $\overline{13}$ 14 15 $\overline{16}$ $\overline{17}$ 18

Les sons séparés l'un de l'autre par le signe — sont distants d'un *limma* pythagoricien $\frac{256}{243}$ (en abrégé $\frac{20}{19}$) ; le signe ‿ indique un intervalle d'un comma $\frac{81}{80}$ seulement. Le limma est environ les $\frac{4}{5}$ et le comma le $\frac{1}{5}$ du demi-ton naturel $\frac{16}{15}$.

Abdul Kadir donne les gammes des douze modes principaux (Makamat) ; les trois premières sont les suivantes :

(1) Kiesewetter, *Musique des Arabes*, d'après les sources originales, avec une préface du baron de Hammer-Purgstall. Leipzig, 1842, p. 32 et 33.

(2) Kosegarten, *Alii Isphenensis liber cantilenarum*, p. 76 à 86.

(3) Kiesewetter, *Musique des Arabes*, p. 33.

1. Uschak... *ut — ré — mi — fa — sol — la — si*♭ — *ut* (hypophrygien),
2. Newa.... *ut — ré — mi*♭ — *fa — sol — la*♭ — *si*♭ — *ut* (hypodorien),
3. Buselik... *ut — ré*♭ — *mi*♭ — *fa — sol*♭ — *la*♭ — *si*♭ — *ut* (mixolydien)

Ces trois gammes sont complétement identiques à celles des anciens Grecs dans le système pythagoricien. Comme les théoriciens arabes partagent ces gammes en la quarte *ut—fa*, et la quinte *fa—ut*, et que *ut*, *fa*, *si*♭, sont considérés comme les sons fixes et invariables, il est très-vraisemblable que le *fa* jouait le rôle de tonique. Alors,

1° Uschak serait la gamme de *fa* majeur (lydien),
2° Newa serait la gamme du mode de quarte de *fa* (phrygien),
3° Buselik serait la gamme du mode de sixte de *fa* (dorien);

mais tous trois dans le système pythagoricien : ils sont aussi considérés par l'école persane comme formant un tout homogène.

Le groupe suivant est formé de cinq modes suivant la gamme naturelle, savoir :

4. Rast........... *ut — ré — mi — fa — sol — la — si*♭ — *ut*
5. Husseini....... *ut — ré — mi*♭ — *fa — sol — la*♭ — *si*♭ — *ut*
6. Hidschaf....... *ut — ré — mi*♭ — *fa — sol — la — si*♭ — *ut*
7. Rahewi......... *ut — ré — mi — fa — sol — la*♭ — *si*♭ — *ut*
8. Sengule....... *ut — ré — mi — fa — sol — la — si*♭ — *ut*.

On peut considérer le Rast comme le mode de quarte d'*ut*, l'Hidschaf comme celui de *fa*, et l'Husseini comme celui de *si*♭ ; ils présenteraient alors exactement les sons de la gamme naturelle. Dans le Rahewi, en le rapportant à la tonique *fa*, la tierce mineure *la*♭ appartient non à la gamme naturelle, mais à la gamme pythagoricienne ; on pourrait le considérer comme le mode de septième de *fa*, dans lequel le rôle de la sensible serait joué par la septième majeure *mi* au lieu de la septième mineure, comme dans notre mode mineur. Dans un mode semblable on ne peut pas, en réalité, exécuter exactement la gamme naturelle avec les dix-sept degrés. Il faut prendre les tierces mineures pythagoriciennes et les tierces majeures naturelles, ou inversement. L'Husseini peut être considéré comme le même mode que le Rahewi, avec la même tierce mineure fausse, mais avec une septième mineure. Enfin, le Sengule serait la gamme majeure avec sixte pythagoricienne. Il en est de même du Rast; les deux modes ne se distinguent que par la valeur différente de la seconde *sol* ou *sol*.

Les quatre derniers Makamat contiennent huit degrés entre les-

quels se trouvent encore des sons intercalaires. Deux d'entre eux sont identiques aux gammes Rast et Sengule, avec un *ut* intercalé entre le *si*♭ et l'*ut*, savoir :

9. Irak........... *ut — ré — mi — fa — sol — la — si*♭ *— ut — ut,*
10. Ifzfahan....... *ut — ré — mi — fa — sol — la — si*♭ *— ut — ut.*

Ceux-ci, transposés d'une quarte, donnent :

11. Büsürg........ *ut — ré — mi — fa — sol — sol — la — si — ut.*

Le dernier est la gamme :

12. Zirefkend...... *ut — ré — mi*♭ *— fa — sol — la*♭ *— la — si — ut,*

qui, si elle est exacte, présente une construction singulière. On pourrait la prendre comme une gamme mineure avec septième majeure, où les sixtes majeure et mineure seraient juxtaposées, mais alors la quinte *sol* serait fausse. En considérant au contraire le *fa* comme la tonique, la quarte manque ; les deux hypothèses ont cependant leur analogue dans le mode mixolydien et hypolydien des Grecs. En ce qui concerne ces dernières gammes à huit sons, il y a d'ailleurs beaucoup de contradictions entre les diverses sources citées par Kiesewetter.

Les quatre modes principaux de la musique persane sont :

1. Uschak...... = *fa* majeur (système pythagoricien),
2. Rast........ = Mode de quarte d'*ut* (gamme naturelle),
3. Husseini..... = Mode de septième de *fa* (gamme naturelle),
4. Hidschaf..... = Mode de quarte de *fa* (gamme naturelle).

Nous trouvons donc ici une prépondérance bien marquée des gammes suivant les intervalles naturels, obtenus par un emploi judicieux de la série des quintes. C'est ce qui rend ce système persan très-intéressant dans l'histoire du progrès de la musique. En outre, nous trouvons dans quelques-unes de ces gammes, des sensibles ascendantes, élément absolument inconnu aux gammes grecques. Ainsi, dans le Rahewi, le *mi* sensible du *fa* se rencontre en même temps que le *la*♭ tierce mineure du *fa ;* ce *la*♭ n'aurait pu exister dans une gamme grecque, sans que le *mi* fût changé en *mi*♭. De même, dans le Zirefkend, en *si* est la sensible d'*ut*, quoique la gamme présente la tierce mineure *mi*♭.

Enfin, un peu plus tard, il se développa en Perse un nouveau sys-

tème musical, avec douze demi-tons à l'octave, analogue au système européen moderne. Kiesewetter fait ici une hypothèse très-invraisemblable ; il suppose que ce système a été introduit en Perse par les missionnaires chrétiens. Il est évident, cependant, que le système précédent, à dix-sept sons, devait, dans l'usage populaire, se transformer en système à douze demi-tons, lorsque le sentiment des nuances plus délicates se fut émoussé et que les sons qui ne différaient que d'un comma furent réputés identiques. Il n'est pas nécessaire de supposer ici aucune influence étrangère ; le système de la musique grecque avait été enseigné depuis longtemps aux Persans et aux Arabes par Farabi ; de plus, en Europe, la théorie musicale n'avait pas encore fait de progrès essentiels au quatorzième et au quinzième siècle, à part les commencements de polyphonie, mais ils n'ont jamais été bien accueillis chez les Orientaux. Par conséquent, les Européens du temps ne pouvaient, hors ces essais imparfaits d'harmonie, rien apprendre aux Orientaux qu'ils ne sussent déjà. Pour moi, je crois qu'on pourrait bien plutôt retourner la question et se demander d'abord, si les bribes imparfaites du système naturel qui se rencontrent chez les Grecs d'Alexandrie ne proviennent pas des traditions persanes, et, en second lieu, si, au temps des croisades, les Européens n'ont pas beaucoup appris des Orientaux sur la musique. Il est très-probable que les instruments à touche, de la famille des luths, ainsi que les instruments à archet, ont commencé en Orient. On pourrait notamment ici poser la question de l'emploi de la sensible, que nous avons trouvée chez les Orientaux, et qui commence à apparaître aussi dans la musique occidentale, à cette époque.

L'emploi de la septième majeure du ton comme sensible de la tonique, marque un nouveau moment, un nouveau pas, pouvant servir à développer la dépendance mutuelle des divers sons d'une gamme, et cela, même sous l'empire de la musique homophone. Le $\underline{si}$, dans la gamme d'*ut* majeur, est de tous les sons celui qui a, avec la tonique, la plus faible parenté, car il a, avec la dominante *sol*, une affinité de tierce plus faible que l'affinité de quinte du *ré*. C'est ce qui explique comment, dans l'heptachorde de Terpandre et dans les airs gaëls où un sixième son est venu s'ajouter à la gamme, la septième a été laissée de côté. Mais, d'autre part, la septième $\underline{si}$ présente, avec la tonique, une relation d'une espèce particulière, que la musique moderne désigne sous le nom de rapport de sensible. La septième majeure $\underline{si}$, en effet, n'est séparée de l'ut_1, l'octave de la tonique, que par le plus petit intervalle de la gamme, le demi-ton ; aussi, à cause de ce voisinage de la tonique, est-il facile de l'émettre avec assez de

sûreté, même en partant de sons qui n'ont pas la moindre affinité avec le *si*. Il est difficile, par exemple, d'exécuter l'intervalle *fa — si*, parce qu'il n'y a aucune affinité entre les deux sons. S'il s'agit, au contraire, de chanter *fa—si—*ut_1, le chanteur pense l'intervalle *fa—*ut_1 qui est d'exécution facile, mais, au lieu de faire monter la voix jusqu'à l'ut_1, il la laisse un peu plus bas sur le *si*, avant d'être tout à fait arrivé sur l'ut_1. Le *si* semble donc, en quelque sorte, annoncer l'ut_1 ; de même l'auditeur ne s'explique cet intervalle que comme une préparation à l'ut_1, et il attend le passage sur cette dernière note. Aussi dit-on que le *si* monte vers l'ut_1 ; qu'il est la *sensible* de la tonique *ut*. Dans ce sens, il arrive alors qu'on prend le *si* un peu trop haut, à peu près à la hauteur du *si*, pour approcher l'ut_1 d'encore plus près, et rendre la relation plus frappante encore.

D'après une sensation personnelle, la relation du *si* avec l'*ut* comme *sensible* me semble beaucoup plus accentuée quand on exécute le passage *fa — si —* ut_1, ou *fa — la — si—*ut_1, où le *si* n'a point d'affinité avec les sons qui le précèdent, que dans le passage *sol—si—*ut_1, par exemple. Je n'ai pourtant rien trouvé à ce sujet dans les écrits sur la musique, et, par suite, je ne sais pas si les musiciens sont disposés à être d'accord avec moi. L'autre demi-ton de la gamme, *mi—fa*, ne semble point monter vers le *fa*, quand la tonalité est bien établie, parce que le *mi* a, avec la tonique *ut*, un rapport nettement indiqué, ce qui le détermine avec sûreté pour le sentiment musical. Aussi l'auditeur ne songera-t-il pas à ne considérer le *mi* que comme le précurseur du *fa*. De même pour l'intervalle *sol — la*♭ du mode mineur. Le *sol* est déterminé par une affinité avec la tonique *ut* encore plus forte que celle du *la*♭.

En revanche, Hauptman n'a pas tort lorsque, comme on l'a dit plus haut, dans l'intervalle *ré—mi*♭ du mode mineur, il trouve que le *ré* peut être considéré comme la sensible du *mi*♭, parce que le *ré* n'est déterminé que par une affinité du second degré avec la tonique *ut* ; la relation est pourtant un peu plus étroite que celle du *si*.

C'est exactement de même que le *ré*♭ du mode de sixte (dorien des Grecs) joue le rôle du *si* dans le mouvement descendant ; il forme, en réalité, une sorte de sensible descendante. Or, les Grecs, à leur apogée, trouvaient les passages descendants plus nobles et plus harmonieux (1) ; cette particularité de la gamme dorienne peut bien avoir

(1) *Aristote*, problemata XIX, p. 33.

eu pour eux une signification particulière, et avoir assuré chez eux la prééminence de ce mode. La terminaison au moyen de l'accord de sixte augmentée

ré♭ — *fa* — *sol* — *si*
ut — *mi*♭ — *sol* — *ut*

est presque le seul débris des anciens modes, resté debout, isolé et inexpliqué dans la musique moderne. C'est là une cadence dorienne, où le *ré*♭ et le *si* jouent simultanément le rôle de sensible par rapport à l'*ut*.

La relation de sensible entre la seconde du mode dorien (parhypate) et le son le plus grave (hypate) de la même gamme, paraît avoir d'ailleurs été bien sentie par les Grecs, à en juger par les remarques d'Aristote à ce sujet, dans le troisième et le quatrième problème sur l'harmonie. Je ne puis m'empêcher de les rapporter ici, parce qu'elles caractérisent le phénomène d'une manière fine et saisissante. Aristote demande pourquoi on sent la voix faire, en chantant le parhypate, un effort plus grand que pour l'hypate, quoique les deux sons soient séparés par un si faible intervalle. On émettra l'hypate en cessant de faire effort. Et il ajoute alors qu'indépendamment de la réflexion qui a pour conséquence la volonté, il faut encore que la nature de l'effort de volonté soit familière et appropriée à l'intelligence, si on veut arriver facilement au résultat désiré (1). L'effort que nous faisons quand nous chantons la sensible, ne réside pas dans le gosier ; ce qui est difficile, c'est de fixer, par la volonté, la voix sur cette note, pendant que nous avons en tête un autre son auquel nous voulons arriver, et grâce au voisinage duquel nous avons trouvé la sensible. Aussitôt parvenus à ce son final, nous nous sentons tranquilles, comme chez nous, et, par conséquent nous le chantons sans effort de volonté.

Le voisinage de deux sons très-rapprochés dans la gamme établit entre eux un nouveau lien, dont l'effet se fait sentir aussi bien dans la relation de sensible à tonique, que dans les intercalations opérées, comme on l'a vu plus haut, entre les notes, dans les modes chromatiques et enharmoniques. Il se passe ici, entre les distances ou différences de hauteur des sons, quelque chose d'exactement analogue à ce qui a lieu dans la mesure des distances dans l'espace. Quand nous avons un moyen de déterminer avec beaucoup de précision et de sûreté un certain point (la tonique), nous pouvons nous en servir pour déterminer sûrement d'autres points placés à une petite distance connue du

(1) Par cette périphrase, je crois avoir exactement rendu le sens du passage : δεῖ γὰρ μετὰ συννοίας καὶ καταστάσεως οἰκειοτάτης τῷ ἤθει πρὸς τὴν βούλησιν.

premier (intervalle de demi-ton), ce que nous n'aurions peut-être pas pu faire directement avec autant de sûreté. Ainsi l'astronomie se sert de certains astres principaux, dont les distances sont mesurées avec la plus grande précision, pour déterminer avec exactitude la position d'autres astres voisins.

La septième majeure, employée comme sensible, arrive à une relation particulièrement étroite avec la tonique, à laquelle n'atteint pas la septième mineure. Le son de la gamme qui a la plus faible affinité avec la tonique, se trouve par là même élevé à une importance particulière. Dans la musique moderne, qui cherche partout à accentuer autant que possible les rapports avec la tonique, cette circonstance a pesé d'un poids toujours croissant, et a fait que, pour le mouvement ascendant vers la tonique, la septième majeure a été préférée dans tous les modes, même dans ceux où elle n'existait pas originairement. Cette évolution paraît avoir commencé en Europe pendant la période de la musique polyphone, et non-seulement dans les chants à plusieurs parties, mais même dans le *Cantus firmus* à une voix de l'Église romaine. Elle fut blâmée en 1322, par une bulle du pape Jean XXII. En conséquence, on s'abstint en général de noter le rehaussement de la sensible, quoiqu'il fût exécuté en réalité par les chanteurs; d'après le rapport de Winterfeld (1), il en était encore ainsi au seizième et au dix-septième siècle pour les airs protestants; c'était devenu un usage. Aussi est-il impossible de suivre exactement la marche de cette transformation des anciens modes.

De tous ces derniers, le mode lydien des Grecs, et l'hypolydien non mélodique (mode de quinte), contenaient seuls la septième majeure comme sensible de la tonique ; aussi le premier s'est-il développé comme le mode principal de la musique moderne, et est-il devenu notre mode majeur. Le mode ionien (mode de quarte) n'en différait que par la septième mineure. Celle-ci a été remplacée par la septième majeure, et le mode est tombé dans le mode majeur. Les trois autres, gratifiés de la septième majeure, se sont fondus peu à peu dans le mode mineur au dix-septième siècle. Le mode phrygien (mode de septième), si on change le *si*♭ en *si*, devient :

La gamme mineure ascendante :

ut — *ré* — *mi*♭ — *fa* — *sol* — *la* — *si* — *ut*,

telle que nous l'avions trouvée précédemment par la seule considération des affinités sonores. L'hypodorien (mode de tierce), qui correspond à notre gamme mineure descendante, donne, par le changement de *si*♭ en *si*,

(1) *Der evangelische Kirchengesang*. Leipzig, 1843, vol. I. Introduction.

La gamme mineure des instruments :

$$ut — ré — \overline{mi\flat} — fa — sol — \overline{la\flat} — \underline{si} — ut,$$

que les chanteurs exécutent difficilement à cause du saut $\overline{la}\flat$—$\underline{si}$, mais qui se présente souvent, en montant et en descendant, dans la musique instrumentale moderne.

On retrouve encore le mode dorien (mode de sixte) avec septième majeure, dans la terminaison par l'accord de sixte augmentée dont on a parlé ci-dessus.

L'introduction de la sensible dans tous les modes montre donc, se développant toujours de plus en plus, le sentiment de la prépondérance d'une tonique dans la gamme. Cette modification n'a pas seulement réduit d'une manière considérable la variété des anciens modes, et diminué essentiellement la richesse des moyens d'expression usités jusque-là ; elle a aussi interrompu et altéré les relations mutuelles des sons de la série originale. Nous avons vu que les plus anciens systèmes étaient des séries de quintes d'abord de cinq, puis de six termes. La domination prépondérante de la tonique comme centre unique du système, n'existait pas encore, ou du moins ne se faisait sentir que d'une manière indirecte, en ce qu'on limitait le nombre des degrés par quintes, aux sons qui existent dans la gamme naturelle. Tous les modes grecs sont formés par la série

$$fa_1 — ut_1 — sol_1 — ré_2 — la_2 — mi_3 — si_3.$$

Mais dès qu'on arrive aux tierces naturelles, on altère la série par l'introduction d'une quinte qui n'est pas tout à fait juste :

$$fa_1 — ut_1 — sol_1 — ré_2 — \underline{la_2} — \underline{mi_3} — \underline{si_3}.$$

La quinte $ré_2$—$\underline{la_2}$ n'est pas juste. Et si on introduit enfin la sensible rehaussée, par exemple le $\underline{\underline{sol\sharp}}$ au lieu du sol dans $\underline{la}$ mineur, on interrompt complétement la série.

Dans l'évolution successive du système diatonique, les considérations basées sur l'affinité des sons pris deux à deux ont dû s'effacer devant d'autres, tirées de la nécessité de relier tous les sons à un centre unique. Et, au fur et à mesure de cette transformation, nous voyons aussi que l'idée de tonalité s'est accentuée de plus en plus nettement dans l'esprit des musiciens.

Le développement ultérieur du système musical européen se rattache d'ailleurs à la naissance de l'harmonie, à laquelle nous allons arriver maintenant.

CHAPITRE XV

ACCORDS CONSONNANTS DU TON.

La première forme, sous laquelle la musique à plusieurs parties parvint à un certain degré de perfection artistique, fut la polyphonie. Le caractère particulier, distinctif de ce genre, consiste en ce que plusieurs parties sont juxtaposées, et que chacune d'elles est une mélodie distincte, soit la répétition du motif précédemment exécuté par les autres, soit quelque chose de tout à fait différent. Dans ces circonstances, chaque partie devait obéir à la loi générale de toute mélodie, c'est-à-dire à la loi de la tonalité, et même, tous les sons de la phrase polyphonique devaient nécessairement se rapporter à la même tonique. Chaque partie, considérée isolément, devait donc partir de la tonique ou d'un de ses plus proches alliés, et aboutir à la tonique. En réalité, dans le commencement, on réunissait toutes les parties d'une phrase polyphonique sur la tonique ou l'une de ses octaves. La loi de la tonalité était observée, mais on était forcé de terminer à l'unisson une phrase de musique polyphone.

Ce qui fait que les octaves supérieures peuvent accompagner la tonique dans la terminaison, c'est que, comme nous l'avons vu dans le précédent chapitre, ces octaves ne sont que la répétition partielle du son fondamental. Par suite, en juxtaposant dans la terminaison une des octaves supérieures à la tonique, nous ne faisons qu'en renforcer certains éléments ; il ne vient donc s'ajouter aucun son nouveau, et l'accord ne contient jamais que les parties constitutives d'un seul son, la tonique.

Il en est exactement de même des autres sons partiels de la tonique. Le premier progrès qui devait se faire dans le développement de l'accord final, devait être l'addition de la douzième. L'accord $ut_0 — ut_1 — sol_1$ ne contient aucun élément étranger au son ut_0, et un morceau dont la tonique est *ut*, pourra convenablement se terminer par tout accord, qui pourra être considéré comme le représentant du son simple *ut*.

De même, l'accord $ut_1 — sol_1 — ut_2$ pourra être employé dans le même sens; car, si on le donne, on entend, faiblement à la vérité, mais néanmoins d'une manière perceptible, s'ajouter le son résultant

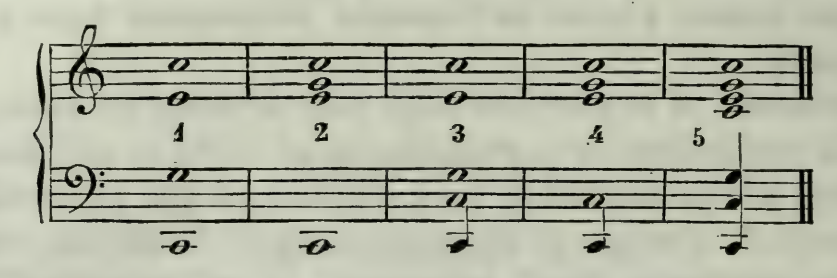
ut_0, et toute la masse sonore ne présente encore que les éléments constitutifs du son ut_0. Cependant, cet assemblage de sons donnerait un timbre inusité, à cause de l'intensité relativement faible du son fondamental.

En revanche, on ne peut faire usage pour terminer un morceau en ut_0, de la combinaison $ut — ut_1 — fa_2$ ou $ut_1 — fa_1 — ut_2$, bien que ces accords soient exactement aussi consonnants que les précédents, parce que le *fa* n'est pas un élément constitutif du son ut_0, et qu'il vient, par conséquent, dans la terminaison, introduire à côté de la tonique, quelque chose qui lui est étranger. C'est probablement là ce qui explique, pourquoi quelques théoriciens du moyen âge voulaient ranger la quarte parmi les dissonnances. C'est que, dans l'accord final, la pureté de la consonnance ne suffit pas encore à permettre l'emploi d'un intervalle. Il doit remplir une seconde condition que les théoriciens n'ont pas bien saisie; les sons de l'accord final doivent être partie intégrante de la tonique; autrement ils ne sont pas admissibles.

Comme la quarte, la sixte ne peut figurer dans l'accord final; mais il n'en est pas de même de la tierce majeure, parce qu'elle se retrouve dans la tonique dont elle forme le cinquième son partiel. Comme les timbres usités en musique font encore entendre le cinquième et le sixième son partiels, et ne donnent que très-faiblement les harmoniques suivants, comme de plus celui qui vient immédiatement après, le septième, forme une dissonnance avec le cinquième, le sixième et le huitième, et manque dans la gamme, la tierce termine la série des sons admissibles dans l'accord final. Jusqu'au commencement du dix-huitième siècle, nous ne trouvons, en effet, pour terminer les morceaux, tantôt que des accords sans tierce, tantôt que des accords majeurs avec tierce majeure, et cela, même dans les modes qui ne contiennent que la tierce mineure et non la tierce majeure. Pour la plénitude de l'harmonie on aimait mieux déroger aux conséquences de la gamme, en faisant entrer la tierce majeure dans l'accord final. La tierce mineure de la tonique ne peut jamais être considérée comme un de ses éléments constitutifs. Dans l'origine, par conséquent, elle était aussi bien proscrite que la quarte et la sixte. Il a fallu que le sentiment harmonique se développât sous un nouvel aspect, avant que les accords mineurs parussent admissibles pour clore un morceau.

La terminaison sur l'accord majeur produit un effet d'autant plus satisfaisant, que les sons reproduisent plus exactement la disposition des sons partiels. Comme dans la musique moderne, la partie supérieure, la plus saillante de toutes, fait ordinairement le chant, elle doit, suivant la règle, se terminer sur la tonique. Par cette considération,

on peut employer comme accord final ceux qui suivent et dont les sons résultants sont indiqués par des noires :



Dans les accords 1 et 2, toutes les notes coïncident avec les sons partiels de l'*ut* grave ; c'est là que l'analogie de l'accord avec le son *ut* se montre le plus frappante. On peut aussi leur substituer d'autres renversements, resserrés dans des limites plus étroites, pourvu qu'ils présentent toujours, comme les deux premiers, l'*ut* comme son fondamental, comme dans 3, 4 et 5. Ils présentent alors, avec l'*ut* grave, une analogie suffisante pour qu'ils puissent être employés comme lui étant équivalents. En outre, ils sont secondés par les sons résultants désignés par des noires dans 3, 4 et 5 et qui font entendre, quoique faiblement, les portions graves du son *ut*. Mais les premiers renversements donneront toujours une terminaison plus satisfaisante. La tendance vers un son final grave, dans la musique harmonique, est un fait très-important, et je crois en avoir trouvé la cause dans l'explication qui précède. Il n'y a rien de semblable dans la composition des mélodies homophones, mais on ne peut appliquer une basse qu'à des phrases à plusieurs parties.

L'emploi de la tonique, comme basse fondamentale de son accord parfait majeur, donne à cet accord de la ressemblance avec le timbre de cette note, qui ressort comme le son le plus essentiel de l'accord ; il en est de même pour les autres accords majeurs, lorsque le son le plus grave du renversement qui occupe le moins d'étendue, est la note fondamentale de l'accord de trois sons. Dans la gamme majeure, les autres accords parfaits sont ceux de la quarte et de la quinte du ton, c'est-à-dire dans la gamme d'*ut*, *fa* — *la* — *ut* et *sol* — *si* — *ré*. Par conséquent, si l'on renferme dans ces trois accords l'harmonie d'un morceau, le son fondamental restant toujours à la basse, on a, dans une certaine mesure, le son de la tonique alternant avec celui de ses plus proches alliés, la quarte et la quinte. On obtient ainsi une harmonie très-claire, très-bien liée, quoique trop monotone pour un morceau un peu long. C'est là, comme on sait, la structure des morceaux populaires modernes, des chansons et des danses. Le peuple, et, en général, les gens dont l'éducation musicale est incomplète, demandent à la musique, pour qu'elle leur plaise, des rapports aussi simples et

aussi intelligibles que possible. Or, l'affinité des sons se manifeste beaucoup plus facilement, et d'une manière beaucoup plus frappante, dans la musique harmonique que dans la musique homophone. Dans cette dernière, le sentiment de l'affinité n'est produit que par deux harmoniques dont la hauteur reste la même dans deux sons *consécutifs*. Mais quand le second d'entre eux arrive à notre oreille, nous n'entendons plus le premier, et c'est à l'aide de la mémoire qu'il faut faire la comparaison. Dans la consonnance, au contraire, l'affinité est donnée directement par la sensation ; nous n'avons plus recours à la mémoire, mais nous entendons des battements, l'accord devient dur, tant que les rapports exacts ne sont pas observés. De même encore, quand deux accords qui ont une note commune viennent l'un après l'autre, la constatation de leur affinité ne résulte pas de la comparaison d'harmoniques faibles, mais de la comparaison de deux notes émises nettement, et avec la même intensité que les autres sons de l'accord considéré.

Si donc, par exemple, je monte d'une sixte à partir de l'*ut*, et que j'arrive au *la*, je ne reconnais dans une mélodie homophone la parenté des deux sons, que par l'identité du cinquième son partiel de l'un, qui est déjà assez faible, avec le troisième de l'autre. Si, au contraire, je joins au *la* l'accord *fa*—*la*—*ut*, j'entends l'*ut* précédent résonner énergiquement dans l'accord, et je perçois directement par la sensation la consonnance du *la* et de l'*ut*, comme faisant tous deux partie intégrante du son *fa*.

Si, dans un chant à une voix, je passe mélodiquement de l'*ut* au *si* ou au *ré*, je suis obligé d'intercaler par la pensée une espèce de *sol* muet, pour reconnaître l'affinité de ces deux sons qui n'est que du second degré. Mais si je fais effectivement résonner le *sol* à côté des deux notes, leur relation commune avec le *sol* redeviendra immédiatement sensible à mon oreille.

L'habitude d'entendre les affinités sonores très-nettement accusées, dans la musique harmonique, a exercé sur notre goût une influence qu'on ne peut méconnaître. Un chant à une voix ne peut plus nous plaire beaucoup : il nous semble vide et incomplet. La simple addition du grincement d'une guitare donnant les accords fondamentaux du ton, et mettant en évidence les affinités harmoniques des sons, éveille au contraire en nous un sentiment de satisfaction. D'autre part, on ne peut le nier, précisément à cause de cette perception plus nette des affinités sonores dans la musique harmonique, on a obtenu une beaucoup plus grande variété dans les relations musicales des sons, parce qu'on a pu utiliser des affinités plus faibles ; en outre, il est de-

venu possible de construire des phrases musicales plus longues, parce que, pour construire un édifice plus considérable, il faut des matériaux de plus grande dimension, et un ciment plus fort.

La relation la plus étroite et la plus simple de toutes se trouve dans la gamme majeure, parce que tous les sons d'un air majeur apparaissent comme harmoniques, soit de la tonique, soit de sa quinte supérieure ou inférieure. Par suite, toutes les affinités des sons se trouvent ramenées aux affinités les plus fortes et les plus étroites du système musical, c'est-à-dire à la relation de quinte.

Le rapport de l'accord de la quinte supérieure *sol* avec l'accord de tonique, diffère, dans une certaine mesure, de celui de l'accord de quinte inférieure *fa* avec le même accord de tonique. Si je passe de *ut — mi — sol* à *sol — si — ré*, je rencontre un son complexe déjà entendu dans le premier accord et dont l'arrivée, par conséquent, a été bien préparée, tandis qu'en même temps, je me trouve avec des notes du ton, les plus éloignées de la tonique, et qui n'ont avec elle qu'une parenté indirecte. Cette marche donne donc à l'harmonie un mouvement très-accentué, mais pourtant très-sûr et bien motivé. C'est l'inverse qui a lieu dans le passage de *ut — mi — sol* à *fa — la — ut*. Le son complexe *fa* n'est pas préparé dans le premier accord; aussi fera-t-il nécessairement l'effet d'un son nouveau, brusquement introduit. Une fois qu'on y est, on se rend compte de la légitimité de ce passage d'un accord à un allié voisin, parce qu'on trouve, dans l'accord de *fa*, des sons directement alliés à la tonique. Dans cette marche, il manque donc le sentiment de clarté et de sûreté, qui se rencontre dans le passage de l'accord d'*ut* à celui de *sol*. En revanche, cette marche de l'*ut* au *fa* présente une sorte de beauté plus douce et plus calme, parce qu'elle se maintient au milieu des alliés directs de la tonique. Malgré cela, et surtout dans la musique populaire, on a préféré le passage à la quinte supérieure qu'on appelle aussi, à cause de cela, la *dominante* du ton, et, dans un grand nombre de mélodies simples ou de danses, l'harmonie ne se meut qu'en alternant l'accord tonique avec l'accord de dominante. C'est aussi pour cela que, dans la disposition habituelle, l'accordéon ordinaire donne l'accord de tonique quand on tire la caisse à vent, et l'accord de dominante quand on la pousse. La quinte inférieure de la tonique s'appelle, par opposition, la *sous-dominante* du ton. Son accord se présente plus rarement dans la majorité des airs populaires, ordinairement une fois avant la fin, pour rétablir l'équilibre de l'harmonie, qui, oscillant en général entre la dominante et la tonique, doit être ramenée du côté de cette dernière.

Quand une reprise d'un morceau se termine par le passage de l'ac-

cord de dominante à l'accord de tonique, et qu'on s'arrête là, les musiciens appellent cette disposition une *cadence entière*. On part des sons qui présentent, dans la gamme, la plus faible affinité avec la tonique, qui lui sont, par conséquent, le plus étrangers, pour revenir à la tonique. C'est donc un mouvement bien marqué des extrémités au centre du système, comme cela doit être dans une terminaison. Si on va, au contraire, de l'accord de sous-dominante à l'accord de tonique, terminant la phrase, cela s'appelle une *demi-cadence* (*cadence plagale*). Les sons de l'accord de sous-dominante sont tous directement alliés à la tonique. Nous nous trouvons donc déjà tout près de la tonique avant d'y arriver. La demi-cadence correspond à une marche plus tranquille de la phrase vers la tonique, et à un mouvement moins accentué.

Dans la cadence entière, on n'entend que les accords de dominante et de tonique ; pour rétablir l'équilibre du côté de la sous-dominante, on introduit encore cette dernière comme dans 1 ou 2.



Cette combinaison donne la *cadence parfaite*, où viennent figurer tous les sons de la gamme, en sorte que, encore à la fin, tous les éléments du ton se trouvent fixés et rassemblés.

C'est dans le mode majeur, comme nous l'avons vu, que se trouvent conciliées de la manière la plus facile et la plus complète, les exigences de la tonalité et de la plénitude de l'harmonie. Les sons de cette gamme sont tous harmoniquement reliés comme parties intégrantes de la tonique, de la quinte supérieure ou inférieure, parce que ces trois notes principales du ton sont en même temps les sons fondamentaux d'accords majeurs. Ce cas ne se présente pas au même degré dans les autres anciens modes.

1. Mode majeur :

fa — *la* — *ut* — *mi* — *sol* — *si* — *ré*

majeur majeur majeur

2. Mode de quarte :

fa — *la* — *ut* — *mi* — *sol* — *si♭* — *ré*

majeur majeur mineur

3. Mode de septième :

fa — *la* — *ut* — *mi*♭ — *sol* — *si*♭ — *ré*

majeur mineur mineur

4. Mode de tierce (mineur) :

fa — *la*♭ — *ut* — *mi*♭ — *sol* — *si*♭ — *ré*

mineur mineur mineur

5. Mode de sixte :

si♭ — *ré*♭ — *fa* — *la*♭ — *ut* — *mi*♭ — *sol*

mineur mineur mineur.

Dans les accords mineurs, la tierce ne rentre pas dans les harmoniques du son fondamental, elle n'en est pas une partie intégrante, et, par conséquent, sa relation avec lui n'est pas aussi immédiatement perceptible que celle de la tierce majeure, ce qui est un inconvénient, surtout dans l'accord final. Aussi trouve-t-on que la presque totalité des danses et des chants populaires modernes sont écrits en majeur; ceux appartenant au mode mineur ne forment encore pour ainsi dire que de rares exceptions. Le peuple demande à la musique le plus de clarté et le plus de simplicité possibles, et c'est ce que donne le mode majeur. Dans la musique homophone, cette prépondérance du majeur n'existait en aucune façon. C'est précisément à cause de cela que l'accompagnement des chœurs écrits en majeur, nous paraît composé d'une manière assez satisfaisante, dès le seizième siècle, en sorte que beaucoup de ces morceaux satisfont pleinement notre sentiment musical moderne; au contraire, les airs écrits dans le mode mineur et les autres modes du plain-chant, à la même époque, présentent des accompagnements encore très-incertains, et qui ont aujourd'hui pour nous quelque chose d'assez étrange.

Dans un accord majeur comme *ut* — *mi* — *sol*, nous pouvons considérer *sol* et *mi* comme des éléments du son complexe *ut*, mais ni *ut* ni *sol* comme des éléments du *mi*, ni *ut* ni *mi* comme des éléments du *sol*. L'accord majeur *ut* — *mi* — *sol* ne présente donc aucune ambiguïté; il ne peut être comparé qu'au son complexe de l'*ut* qui en est, par conséquent, le *son principal*, le son dominant, ou, suivant la notation de Rameau, la *basse fondamentale;* aucun des deux autres sons n'a le moindre droit de prétendre à cette place.

Dans l'accord mineur *ut* — *mi*♭ — *sol*, le *sol* est un élément commun aux deux sons complexes *ut* et *mi*♭. Ni le *mi*♭ ni l'*ut*, considérés isolément, ne font partie des deux autres sons de l'accord. Le

sol est donc dans tous les cas un son dépendant. En revanche, on peut considérer cet accord mineur comme le son complexe *ut*, auquel est ajouté l'élément étranger *mi*♭, ou bien comme le son complexe *mi*♭ auquel est associé l'*ut*. Les deux cas se présentent. C'est néanmoins la première manière de voir qui domine le plus habituellement. En effet, si nous considérons l'accord comme analogue au son complexe *ut*, nous y trouvons le *sol* comme troisième son partiel, et le son étranger *mi*♭ au lieu du cinquième son partiel plus faible *mi*. Considérons au contraire l'accord comme l'équivalent du son complexe *mi*♭, le cinquième son partiel faible est exactement représenté par le *sol*, mais au lieu du troisième plus fort, qui devrait être le *si*♭, nous trouvons le son étranger *ut*. Aussi, généralement, dans la musique moderne, trouvons-nous l'accord mineur *ut* — *mi*♭ — *sol* employé de manière que l'*ut* en soit la basse fondamentale ; il représente le son complexe *ut* un peu modifié et troublé. Mais, sous la forme *mi*♭ — *sol* — *ut*, cet accord se présente aussi dans la gamme de *si*♭ majeur, comme accord de sous-dominante *mi*♭. Rameau l'appelle alors accord de sixte majeure, et considère, avec plus de raison que les théoriciens modernes en général, le *mi*♭ comme la basse fondamentale.

Dans les cas où il s'agit de déterminer d'une manière précise l'une ou l'autre de ces significations de l'accord mineur, on peut arriver à ce résultat en mettant en évidence le son fondamental, soit par la région grave où on le place, soit par le nombre de parties qui se réunissent sur lui. La gravité du son fondamental donne à toutes les notes qui rentrent dans ses harmoniques, le caractère de sons partiels directs, tandis que la basse ne peut être considérée comme un son partiel des notes plus élevées. Ainsi, dans la première moitié du siècle dernier, où l'on commença pour la première fois à faire usage des accords mineurs comme terminaisons, les compositeurs cherchent à dissimuler la tierce sous l'intensité prépondérante de la tonique. Dans les *oratorios* de Hændel, on trouve régulièrement que, lorsque la terminaison se fait sur un accord mineur, la majorité des parties vocales et instrumentales sont concentrées sur la tonique, tandis que la tierce mineure est donnée par une seule voix, ou même seulement par l'accompagnement de clavecin ou d'orgue. Chez Hændel, il est très-rare de voir les morceaux mineurs se terminer, deux parties seulement prenant la tonique, une autre la quinte, et une quatrième la tierce ; dans les morceaux majeurs, au contraire, cette distribution est de règle.

Quand l'accord mineur est employé dans sa seconde acception, dans le renversement *mi*♭ — *sol* — *ut*, avec le *mi*♭ comme son fon-

damental, le *mi*♭ est désigné comme remplissant ce rôle, soit par sa position à la basse, soit par son étroite affinité avec la tonique *si*♭. La musique moderne précise d'une manière encore plus nette la nature de l'accord, en lui associant le *si*♭ comme quinte de *mi*♭; l'accord dissonnant se présente alors sous la forme *mi*♭ — *sol* — *si*♭ — *ut*.

La répugnance des anciens compositeurs à finir sur un accord mineur s'explique en partie par l'altération de la consonnance, troublée par des sons résultants faux, et en partie par la circonstance énoncée plus haut, à savoir que l'accord mineur, au lieu de reproduire purement et simplement le son complexe de la tonique, introduit de nouveaux éléments qui lui sont étrangers. Pas plus que la tierce mineure, les sons résultants ne rentrent dans le son de la tonique. Tant que le sentiment de la tonalité ne consistait que dans le choix d'un son déterminé, simple ou complexe, comme centre attractif du mode, on ne pouvait admettre, en réalité, comme véritable terminaison que la reproduction pure et simple du son de la tonique, sans aucun alliage d'élément étranger. Il fallait un progrès nouveau dans le sentiment musical, dans l'appréciation du rôle propre de chaque accord dans le ton, avant que l'accord mineur, malgré les éléments étrangers à la tonique qu'il présente, pût paraître suffisamment justifié dans la terminaison.

Hauptmann (1) donne une autre explication de la rareté de l'emploi de l'accord mineur comme terminaison. Il prétend qu'avant l'usage des accords de septième, il n'y avait aucune partie pouvant préparer suffisamment la tierce mineure de l'accord final. Si, par exemple, la cadence finale est formée par les accords *sol* — *si* — *ré* — et *ut* — *mi*♭ — *sol*, il n'y aurait que le *ré* du premier qui, mélodiquement, pût tendre vers le *mi*♭, mais cette note jouerait alors le rôle de la sensible *ré* dans la gamme de *mi*♭ majeur, et ce serait éveiller le sentiment de ce ton. Si nous voulons admettre que ce rapport de sensible attire particulièrement l'attention de l'auditeur et puisse détruire dans une certaine mesure le sentiment de la tonalité, on aurait pu trouver, abstraction faite des accords de septième, un grand nombre de manières de conduire les parties à travers des dissonnances, de façon à préparer la tierce mineure de l'accord final, si cette nécessité se fût fait sentir. En effet, dans la cadence plagale, si employée anciennement,

ut — *mi*♭ — *sol* — *ut*
fa — *fa* — *la*♭ — *ut*
ut — *mi*♭ — *sol* — *ut*,

le passage de la quarte *fa* à la tierce mineure *mi*♭ se fait sans aucune

(1) *Harmonik und Metrik*. Leipzig, 1853, p. 216.

secousse. En outre, lorsqu'on commença à employer les accords de septième, la septième *fa* de l'accord *sol — si — ré — fa* aurait dû nécessairement se résoudre sur la tierce *mi*♭ de l'accord final. Au contraire, au moment de l'apparition de la septième à partir du quinzième siècle (1), on la fait monter sur la quinte de l'accord final, ou descendre sur la tierce majeure *mi*, et les choses restèrent ainsi jusqu'à l'époque de Bach.

Dans le treizième chapitre, nous avons caractérisé la musique harmonique moderne, par opposition à la musique polyphone du moyen âge, en disant qu'elle a développé le sentiment du rôle propre des accords. Par le fait, nous trouvons déjà dans Palestrina, Gabrieli, et encore plus dans Monteverde et dans les premiers compositeurs d'opéras, les différents degrés d'harmonie des accords soigneusement employés en vue de l'expression. Mais il manque encore presque absolument chez ces maîtres, la considération de l'affinité mutuelle des accords qui se suivent. Ceux-ci se succèdent souvent d'une manière tout à fait indépendante, et le seul lien qui les rattache entre eux est la gamme, dans laquelle sont pris tous les intervalles qui servent à les former.

L'évolution qui s'est opérée du seizième au commencement du dix-huitième siècle, peut, à mon avis, se définir en disant, que le sentiment de l'affinité mutuelle des accords s'est développé, et que, dans la série des accords consonnants du ton, on a cherché un centre commun d'attraction qu'on a trouvé dans l'accord tonique. On retrouve ici, pour les accords, la même tendance qui s'est déjà manifestée dans la construction des gammes. On a cherché aussi, entre les intervalles de la gamme, une affinité s'exerçant d'abord par enchaînement des accords, puis les reliant à un centre unique, la tonique.

J'appelle *alliés directs* deux accords qui ont une ou plusieurs notes communes.

Les accords sont *alliés au second degré* lorsqu'ils ont, avec le même accord consonnant, une affinité directe.

Ainsi *ut—mi—sol* et *sol—si—ré* sont alliés directs ; il en est de même de *ut—mi—sol* et de *la—ut—mi* ; mais *sol—si—ré* et *la—ut — mi*, sont alliés au second degré.

Quand deux accords différents ont deux sons identiques, leur affinité est plus grande que s'il n'y a qu'une note commune. Ainsi, *ut — mi — sol*, et *la — ut — mi* sont plus étroitement alliés que *ut — mi — sol* et *sol — si — ré*.

(1) Voir un exemple d'Anton Brumel dans Forkel, *Histoire de la Musique*, vol. II, p. 647. — Un autre avec cadence plagale de Josquin, même ouvrage, p. 550, où la conduite des voix permettrait d'arriver sans difficulté à la tierce mineure.

Dans un ton, il ne peut naturellement exister qu'un seul accord de tonique qui reproduise plus ou moins exactement le son de cette note, c'est l'accord majeur ou mineur avec la tonique à la basse. En effet, dans un air régulièrement écrit à une seule partie, la tonique, considérée comme centre attractif des sons, doit se faire entendre au premier temps fort du commencement, et à la fin du morceau, en sorte que cette note fondamentale est à la fois le point de départ et le point d'arrivée de la mélodie ; il en est de même de l'accord de tonique dans une suite d'accords. Non-seulement nous voulons entendre la tonique en ces deux endroits de la phrase, mais nous ne pouvons admettre pour elle, à ces deux places, d'autre accompagnement que l'accord de tonique avec cette note à la basse. Il en était autrement encore au seizième siècle, comme le montre l'exemple de Palestrina cité plus haut (page 325).

Quand l'accord de tonique est majeur, à la prépondérance incontestée de la tonique sur les autres sons, vient s'ajouter la prépondérance de l'accord de tonique sur les autres accords. En effet, quand le morceau commence et finit par cet accord, le début et la terminaison présentent également, dans toute sa pureté, sans alliage étranger, le son complexe de la tonique. Si, au contraire, l'accord de tonique est mineur, toutes ces conditions ne peuvent se trouver remplies d'une manière aussi complète. Il faut rabattre un peu de la rigueur de la tonalité, pour pouvoir admettre la tierce mineure de l'accord tonique au commencement et à la fin du morceau. Nous trouvons encore chez Sébastien Bach, au début du dix-huitième siècle, l'accord mineur terminant, il est vrai, les préludes, parce que ce ne sont que des morceaux d'introduction, mais jamais employé à la fin des fugues, des *chorals*, et d'autres phrases véritablement finales. Chez Hændel et même dans la musique sacrée de Mozart, la terminaison sur l'accord mineur alterne avec d'autres, ne contenant que la tierce majeure ou pas de tierce du tout. Et, chez ce dernier auteur, on ne peut en aucune façon expliquer ce procédé par une imitation de l'ancienne manière ; car c'est toujours essentiellement l'expression du morceau qu'il a en vue. Si, à la fin d'une phrase écrite en mineur, arrive un accord majeur, il semble toujours que le caractère sombre du mode mineur s'illumine tout à coup d'un éclat inattendu ; venant après le sentiment de sombre amertume, de douleur cruelle, d'inquiétude qu'éveille en nous la phrase mineure, une terminaison de ce genre a quelque chose de lumineux, de calmant, de consolant. Ainsi, au moment où la prière pour le bonheur des trépassés finit sur les mots : *et lux perpetua luceat eis*, lorsque le *confutatis maledictis* s'achève par l'invocation :

Oro supplex et acclinis,
Cor contritum quasi cinis,
Gere curam mei finis,

la terminaison se fait sur l'accord majeur. Elle présente cependant, toujours pour notre sentiment musical moderne, quelque chose d'inattendu, quoique cette entrée du majeur tantôt développe une beauté, une solennité particulière, tantôt pénètre comme un rayon d'espoir, dans l'abîme de la plus profonde contrition. Si le sentiment d'inquiétude doit persister jusqu'à la fin, comme dans le *Dies iræ* du *Requiem* de Mozart, l'accord mineur convient très-bien pour finir; car il présente lui-même une sorte d'ambiguïté, d'incertitude persistante quand il est employé comme accord final. Mozart termine ordinairement les phrases de musique sacrée d'un caractère indéterminé, par un accord dépourvu de tierce. On trouve un grand nombre d'exemples analogues chez Hændel. Par conséquent, ces deux maîtres, bien que placés tout à fait au point de vue du sentiment musical moderne, bien qu'ayant mis la dernière main à la construction du nouveau système musical, n'étaient pas tout à fait étrangers au sentiment qui empêchait les anciens compositeurs d'employer la tierce mineure de la tonique dans la terminaison. Cependant ils n'en faisaient, ni l'un ni l'autre, une règle invariable; ils se réglaient sur l'expression et le caractère de la phrase et sur le sens des mots qu'ils avaient à la fin des morceaux.

Les modes les plus appropriés à un tissu harmonique aussi serré, sont ceux qui peuvent admettre le plus grand nombre d'accords consonnants alliés entre eux et avec l'accord tonique. Comme tous les accords consonnants, sous leur forme la plus simple, la plus resserrée, sont formés d'une tierce majeure et d'une tierce mineure, nous trouvons tous les accords consonnants d'un ton, en ordonnant simplement tous les intervalles par tierces, comme dans le tableau suivant. Les accords de trois sons sont reliés isolément par des accolades, l'accord de tonique est désigné par des notes écrites en majuscules.

1° Mode majeur :

ré — *fa* — *la* — UT — MI — SOL — *si* — *ré*;

2° Mode de quarte :

si♭ — *ré* — *fa* — *la* — UT — MI — SOL — *si*♭ — *ré*;

3° Mode de septième :

si♭ — *ré* — *fa* — *la* — UT — MI♭ — SOL — *si*♭ — *ré*;

4° Mode de tierce (mode mineur) :

si♭ — *ré* — *fa* — *la*♭ — UT — MI♭ — SOL — *si*♭ — *ré*;

5° Mode de sixte :

si♭ — *ré*♭ — *fa* — *la*♭ — UT — MI♭ — SOL — *si*♭.

Dans ce tableau, on a tenu compte des différentes valeurs de la seconde et de la septième du ton, que nous avons trouvées dans la construction des gammes pour la musique homophone. Nous remarquons ici que, si ce n'est dans le mode de sixte, les accords directement alliés à l'accord de tonique présentent tous les intervalles de la gamme. La seconde et la septième se présentent d'abord dans l'accord de *sol*, allié direct de l'accord de tonique, et, en second lieu, dans les accords qui contiennent le *fa*, mais qui n'ont pas une affinité directe avec l'accord de tonique. Par là, dans la musique harmonique, les sons complémentaires de la gamme, alliés de la dominante, l'emportent notablement sur les alliés de la sous-dominante. Là où les affinités directes des accords suffisent à déterminer les intervalles, nous devons les préférer aux affinités indirectes. En nous restreignant, par conséquent aux accords directement alliés à l'accord tonique, nous obtenons le tableau suivant pour les différents modes :

1° Mode majeur :

fa — *la* — UT — MI — SOL — *si* — *ré*;

2° Mode de quarte :

fa — *la* — UT — MI — SOL — *si*♭ — *ré*;

3° Mode de septième :

fa — *la* — UT — MI♭ — SOL — *si*♭ — *ré*;

4° Mode de tierce :

fa — *la*♭ — UT — MI♭ — SOL — *si*♭ — *ré*;

5° Mode de sixte :

$$(\overline{\textit{ré}\flat}) — \textit{fa} — \overline{\textit{la}\flat} — \text{UT} — \overline{\text{MI}\flat} — \text{SOL} — \overline{\textit{si}\flat}.$$

Il suffit de jeter un coup d'œil sur ce dernier tableau, pour voir que les séries d'accords les plus complètes, les mieux coordonnées, sont fournies par le mode majeur et le mode de tierce (mode mineur), en sorte que, dans le travail harmonique, ces deux modes devaient obtenir sur les autres une préférence décidée. C'est là aussi la circonstance sur laquelle repose leur prééminence dans la musique harmonique moderne.

La hauteur des sons complémentaires de la gamme, au moins pour les quatre premiers modes, se trouve donc ainsi définitivement fixée. Hauptmann, avec raison selon moi, ne considère comme élément essentiel de la gamme d'*ut* majeur et d'*ut* mineur, que le son *ré* qui forme avec le *fa* une tierce fausse, en sorte que l'accord *ré* — *fa* — $\underline{\textit{la}}$ doit être tenu pour dissonnant. Par le fait, l'accord ainsi formé est très-nettement dissonnant. Par contre, Hauptmann admet qu'on a une gamme majeure qui tend vers la sous-dominante, lorsqu'on remplace le *ré* par le $\underline{\textit{ré}}$. Cette manière de présenter les faits me paraît être une expression très-heureuse de la véritable nature des choses. Si l'accord consonnant $\underline{\textit{ré}}$ — *fa* — $\underline{\textit{la}}$ figure dans une phrase, on ne peut pas immédiatement et sans intermédiaire revenir à l'accord tonique *ut* — $\underline{\textit{mi}}$ — *sol*. Ce serait là une transition harmonique non préparée. C'est donc exprimer exactement la chose que de présenter cet accord comme le début d'une modulation sur les limites du ton d'*ut* majeur, sur les limites de l'affinité directe de l'accord tonique. Dans la gamme mineure la modulation correspondrait à l'accord $\overline{\textit{ré}}$ *fa* — $\overline{\textit{la}\flat}$. Néanmoins, dans la gamme tempérée actuelle, on ne distingue pas l'accord consonnant $\underline{\textit{ré}}$ — *fa* — $\underline{\textit{la}}$ de l'accord dissonnant *ré* — *fa* — $\underline{\textit{la}}$, et, par suite, la signification de la différence établie par Hauptmann n'est pas nettement indiquée.

En ce qui concerne l'autre son complémentaire douteux, le $\overline{\textit{si}\flat}$, qui peut se présenter dans les accords $\overline{\textit{mi}\flat}$ — *sol* — $\overline{\textit{si}\flat}$ et *sol* — $\overline{\textit{si}\flat}$ — *ré*, on a déjà dit dans le précédent chapitre, que, même dans la musique homophone, il était presque toujours remplacé par un $\underline{\textit{si}}$, en montant. L'emploi du $\underline{\textit{si}}$ a aussi été favorisé par des considérations harmoniques, indépendamment de la nature du mouvement mélodique. On a déjà fait remarquer plus haut que si les deux sons de la gamme faiblement alliés à la tonique, sont pris parmi les éléments du son com-

plexe de la dominante, ils n'ont avec la tonique qu'une relation très-faible. Mais cela ne peut avoir lieu qu'avec les sons de l'accord majeur *sol — si — ré*, et non avec ceux de l'accord mineur *sol — si♭ — ré*. Par eux-mêmes, *si♭* et *ré* sont alliés à l'*ut* exactement d'aussi près que le *si* et le *ré*. Mais, en considérant ces derniers comme faisant partie du *sol*, nous les relions à l'*ut* par l'affinité qu'a pour lui le *sol*. Aussi, dans la musique moderne, partout où le son *si♭* se présente comme partie intégrante de l'accord de dominante ou d'un accord dissonnant qui en tient lieu, change-t-on ordinairement cette note en *si*, et emploie-t-on, selon la marche de la mélodie et de l'harmonie, tantôt *si♭*, tantôt *si*, mais plus souvent le dernier, comme je l'ai déjà remarqué plus haut dans la construction de la gamme mineure. Par cet usage systématique de la septième majeure *si* au lieu de la septième mineure *si♭*, le mode mineur moderne se distingue de l'ancien hypodorien ou mode de tierce. Ici encore, par conséquent, on a sacrifié un peu de la logique de la gamme, pour donner à l'harmonie plus de cohésion.

L'enchaînement des accords consonnants du mode mineur devient, il est vrai, un peu moins riche quand, par l'introduction du son *si*, nous changeons le mode de tierce en notre mode mineur. Au lieu de la suite :

fa — la♭ — ut — mi♭ — sol — si♭ — ré,

nous avons la suivante :

fa — la♭ — ut — mi♭ — sol — si — ré

avec un accord de moins. Néanmoins, le choix reste toujours libre entre le *si♭* et le *si*.

L'introduction de la sensible *si* dans la gamme d'*ut* mineur donne lieu à une nouvelle difficulté pour la cadence entière dans ce ton. Quand les accords *sol — si — ré* et *ut — mi♭ — sol* se succèdent, le premier présente l'harmonie pleine particulière au majeur, et le second l'harmonie plus étouffée du mineur, qui ressort encore davantage par le contraste avec l'accord précédent. Or, c'est précisément dans la terminaison que l'oreille a besoin d'une consonnance pleine, pour pouvoir y trouver un repos complet. Il fallait donc inventer les accords de septième qui transforment en dissonnance l'accord de dominante, avant de pouvoir admettre une terminaison de ce genre.

Il résulte de l'exposition qui précède que, tant qu'on veut établir entre les accords du ton, un étroit enchaînement suivant le principe qui règle l'enchaînement des sons dans la gamme, tant qu'on veut que tous les accords consonnants de la trame harmonique soient reliés à l'un d'entre eux, l'accord de tonique comme tous les sons de la gamme se relient à un seul son central, la réunion de ces deux conditions conduit aux deux seuls modes qui les remplissent le plus complétement, c'est-à-dire au mode majeur et au mode mineur.

C'est le mode majeur qui satisfait le plus complétement aux exigences de l'affinité des accords et des sons. Il présente quatre accords immédiatement alliés à l'accord tonique :

fa — *la* — *ut* — *mi* — *sol* — *si* — *ré*.

On peut l'harmoniser, et c'est le cas, comme on l'a dit, des morceaux populaires qui doivent être facilement intelligibles, de telle sorte que tous les sons apparaissent comme faisant partie des trois accords majeurs du système, de la tonique, de la dominante et de la sous-dominante. Des accords de ce genre, avec le son fondamental à la basse, semblent renforcer, pour l'oreille, les sons de la tonique, de la dominante et de la sous-dominante, qui sont, à leur tour, aussi étroitement reliés que possible par la relation de quinte. Dans ce mode, par conséquent, tout peut se réduire aux plus fortes, aux plus étroites affinités que présente la musique. Et, comme l'accord tonique représente immédiatement et complétement le son de la tonique, la prépondérance de cette note et celle de son accord se trouvent en même temps assurées, sans trouver aucun obstacle, sans qu'il soit nécessaire d'altérer la gamme en aucune manière.

Le mode majeur est donc caractérisé par le plus de logique dans la mélodie et l'harmonie, le plus de simplicité et de clarté dans toutes les relations. Ajoutons à cela que les accords majeurs qui dominent chez lui, se distinguent par la plénitude et la pureté de l'harmonie, quand on en choisit les renversements de manière à éviter tout son résultant faux.

La gamme majeure est régulièrement diatonique et munie de la septième majeure formant sensible ascendante, ce qui établit une étroite relation mélodique, dans la gamme, entre la tonique et le son qui présente avec elle la plus faible affinité harmonique.

A côté des accords majeurs qui dominent, viennent se placer encore, dans le ton, deux accords mineurs étroitement liés à l'accord tonique, et qu'on peut utiliser pour interrompre la série des accords majeurs.

Sous beaucoup de rapports, le mode mineur vient après le mode

majeur. Sous sa forme moderne, il nous fournit la série des accords suivants :

fa — $\overline{la\flat}$ — *ut* — $\overline{mi\flat}$ — *sol* — $\underline{si}$ — *ré*.

Les accords mineurs ne représentent pas le son complexe de leur basse fondamentale, aussi purement et d'une manière aussi simple que les accords majeurs ; leur tierce ne rentre pas dans les éléments constitutifs de cette note. Le seul accord de dominante est majeur, et contient les deux sons complémentaires de la gamme. Par suite, ces deux derniers, lorsqu'ils font partie de l'accord de dominante et qu'ils apparaissent comme éléments constitutifs du son de cette note, sont étroitement liés à la tonique par une relation de quinte. En revanche, les accords de tonique et de sous-dominante ne représentent pas exactement le son de leurs basses respectives ; ils sont accompagnés de leurs tierces, qui ne peuvent être déduites d'une relation de quinte avec la tonique. Dans le mode mineur, par conséquent, l'enchaînement harmonique des sons avec la tonique ne peut se ramener à des affinités aussi puissantes que dans le mode majeur.

Les exigences de la tonalité ne peuvent pas non plus se concilier, aussi simplement que dans le majeur, avec la prépondérance de l'accord de tonique. Quand une phrase se termine par un accord mineur, à côté du son de la tonique, subsiste encore un autre son qui lui est étranger. De là, la longue hésitation des compositeurs à admettre la terminaison en mineur.

Les accords mineurs quand ils dominent, ne présentent pas la limpide clarté, la pure harmonie des accords majeurs, parce qu'ils sont accompagnés de sons résultants qui ne rentrent pas dans l'accord.

La gamme mineure contient l'intervalle $\overline{la\flat}$ — $\underline{si}$ d'exécution difficile pour le chanteur ; il est plus grand que le ton de la gamme diatonique et correspond au rapport numérique $\frac{75}{64}$. Dans l'emploi mélodique de la gamme mineure, il faut tolérer, en montant et en descendant, diverses modifications qui ont déjà été énumérées dans le chapitre précédent.

Le mode mineur ne présente donc pas la même logique simple, claire, facile à saisir, que le mode majeur ; il est né, pour ainsi dire, d'un compromis entre les diverses exigences de la loi de la tonalité et de l'enchaînement de la trame harmonique. Il est aussi, par là même, beaucoup plus modifiable, et se prête beaucoup mieux aux modulations dans d'autres tons.

L'opinion que le mode mineur présente une construction moins

parfaitement logique, trouvera de l'opposition chez beaucoup de théoriciens modernes, exactement comme la prétention émise plus haut par moi, et, avant moi, par d'autres savants, que la consonnance des accords mineurs était généralement moins satisfaisante que celle des accords majeurs. Dans les nouveaux traités d'harmonie, le contraire est souvent affirmé avec vivacité. Mais, à mon avis, l'histoire de la musique, le développement lent et timide du mode mineur au seizième et au dix-septième siècle, l'emploi également timide chez Hændel, presque rare encore chez Mozart, de la cadence mineure, toutes ces circonstances réunies ne peuvent permettre de douter que le sentiment artistique des grands compositeurs ne soit d'accord avec mes conclusions. Ajoutez à cela l'alternance entre la septième majeure et la septième mineure, la sixte majeure et la sixte mineure, les modulations rapides et variées, enfin aussi, ce qui est très-décisif, l'usage populaire. Les mélodies populaires ne peuvent présenter que des relations claires, évidentes par elles-mêmes. Qu'on jette les yeux sur les recueils des airs préférés actuellement par les classes des peuples occidentaux qui ont souvent occasion d'entendre de la musique harmonique, par les étudiants, les soldats, les ouvriers. Pour cent airs majeurs, on en trouvera peut-être un ou deux en mineur; encore est-ce en général d'anciennes mélodies populaires, empruntées à l'époque où le chant à une seule partie dominait encore.

Je ne crois pas d'ailleurs que ces résultats constituent une infériorité du mode mineur. Le mode majeur convient bien à tous les sentiments bien caractérisés, clairs par eux-mêmes, à la résolution énergique, comme à la modération ou à la douceur, à la tristesse même, lorsqu'elle se mêle à une impatience tendre ou enthousiaste. Mais il ne convient pas du tout aux sentiments sombres, inquiets, inexpliqués, à l'expression de l'étrangeté, de l'horreur, du mystère ou du mysticisme, de l'âpreté sauvage, de tout ce qui contraste avec la beauté artistique. C'est précisément pour tout cela que nous faisons usage du mode mineur avec son harmonie voilée, sa gamme variable, ses modulations faciles, son principe et sa structure plus incertains pour l'oreille. La forme majeure ne serait point appropriée aux expressions de cette nature, et, par là, à côté d'elle, le mode mineur trouve pleinement sa raison d'être dans l'art.

Les propriétés harmoniques des gammes modernes se manifestent surtout par la comparaison avec l'harmonie fournie par les autres anciens modes.

Parmi les modes mélodiques, le lydien des Grecs (ionien du plain-chant) coïncide avec notre majeur; c'est le seul qui présente la septième majeure comme sensible ascendante. Les quatre autres ont,

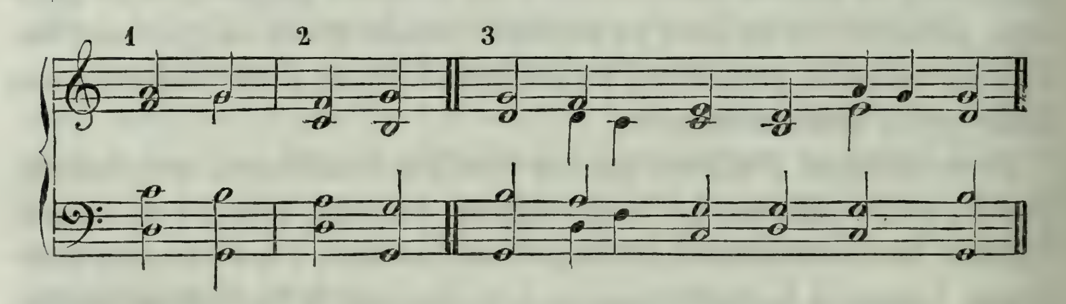
conformément à leur origine naturelle, des septièmes mineures, que, vers la fin du moyen âge, on commença à changer en septièmes majeures, pour rattacher plus étroitement à la tonique des alliés éloignés par la relation de sensible dans la terminaison.

En ce qui concerne le mode de quarte (ionien des Grecs, mixolydien du plain-chant), il ne se distingue du majeur que par la septième mineure; le changement de celle-ci en septième majeure fait disparaître toute différence entre les deux. Si la tonique est *sol*, l'accord tonique, un accord majeur, ne peut être que *sol* — *si* — *ré*, et les accords du ton seraient enchaînés de la manière suivante :

ut — *mi* — *sol* — *si* — *ré* — *fa* — *la.*

Si l'on cherche à former une cadence entière, comme dans les exemples 1 et 2 ci-dessous, on obtient quelque chose d'assez terne, parce que la sensible fait défaut, même si l'on change l'accord de dominante en accord de septième.

Mode de quarte.



Le n° 2, où la fausse sensible est à la partie supérieure, sonne d'une manière encore moins satisfaisante que le n° 1, où elle se dissimule davantage. Dans ces exemples, le *fa* est un son très-incertain. Il n'est pas assez allié à la tonique, il ne fait pas partie du son de la dominante *ré*, il n'est pas assez voisin de la tonique pour jouer le rôle de sensible, et il lui manque la tendance vers la tonique qui caractérise cette note. Aussi les anciens compositeurs terminaient-ils les phrases écrites en mode de quarte, lorsqu'ils voulaient finir autrement qu'en mode majeur, par la demi-cadence ou cadence plagale, telle que je l'ai employée dans l'exemple n° 3. Il y manque le mouvement nettement accentué, par lui-même, de la cadence entière, et le défaut de mouvement qu'entraîne le défaut de sensible, ne s'y montre pas d'une manière frappante.

Dans le cours d'une phrase écrite en ce mode, la sensible peut être souvent employée en montant, si, en descendant, la septième mineure s'y montre d'une façon suffisamment fréquente. Mais c'est précisé-

ment dans la terminaison qu'il est mauvais d'altérer une particularité essentielle de la gamme. Les phrases en mode de quarte font l'effet de phrases en majeur, qui auraient une tendance marquée à moduler dans le ton de la sous-dominante majeure. Par les motifs donnés plus haut, le mouvement vers la sous-dominante est moins actif que celui vers la sus-dominante. Car il manque au mode de quarte, même dans ses terminaisons, un mouvement nettement prononcé, tandis que les accords majeurs dont fait partie l'accord tonique, exercent une prédominance par la plénitude de leur harmonie. Le mode de quarte doit donc, d'après cela, être doux et harmonieux comme le mode majeur, mais il lui manque l'élan énergique de son rival. Winterfeld (1) le caractérise d'une manière analogue. Il montre le mode ionien du plain-chant (mode majeur), comme une série de sons qui, « se terminant d'elle-« même, fondée sur l'accord de trois sons rayonnants et vigoureux, sur « la fusion harmonieuse de différents sons, porte aussi l'empreinte d'une « vive, d'une joyeuse satisfaction. » Par opposition, il définit le mixolydien du plain-chant (mode de quarte), une série de sons « dans la-« quelle tous les éléments sonores tendent vers l'origine d'où émane « le son fondamental » (c'est-à-dire vers le ton de la sous-dominante majeure), « à travers laquelle perce une légère inquiétude à côté d'une « douce satisfaction, semblable à l'aspiration du chrétien vers une re-« naissance spirituelle, une rédemption, un retour à l'innocence pri-« mitive, tempérée cependant par la béatitude de l'amour et de la foi. »

Le mode de septième (phrygien des Grecs, dorien du plain-chant), présente un accord mineur de tonique sur le *ré*,

sol — *si* — *ré* — *fa* — *la* — *ut* — *mi*

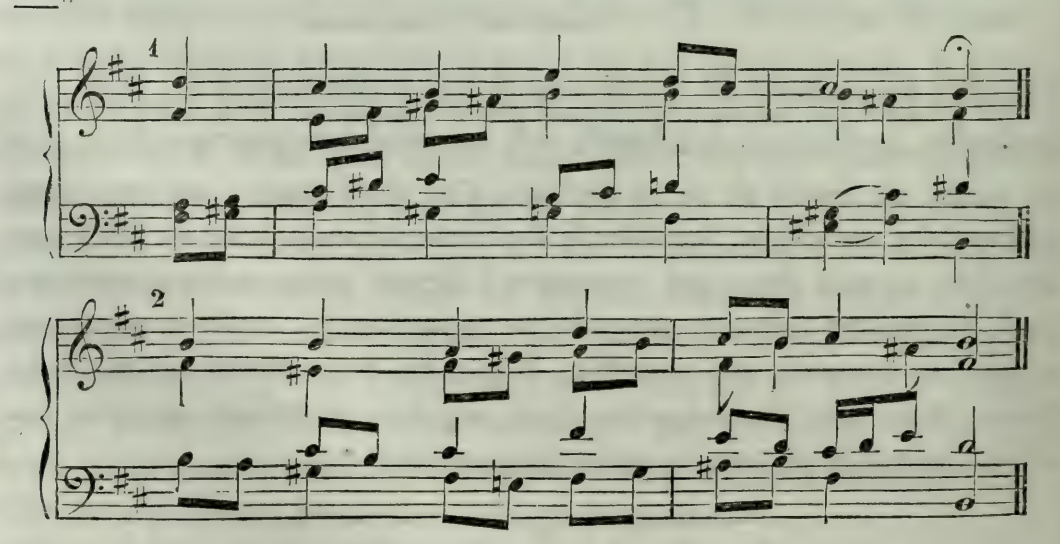
un autre exactement de même nature sur la dominante *la*, mais, en revanche, sur la sous-dominante *sol*, un accord majeur qui distingue ce mode du *mode de tierce* (éolien). Ces deux modes peuvent, sans altérer leur caractère, hausser la septième mineure pour en faire une sensible, et tous deux ont concouru à former notre mode mineur actuel. La gamme mineure ascendante appartient au mode de septième auquel on a donné une sensible, la gamme descendante au mode de tierce. Mais, par l'introduction de la sensible, on réduit aux trois accords essentiels du ton, la série des accords :

sol — *si* — *ré* — *fa* — *la* — *ut*♯ — *mi*.

(1) *J. Gabrieli et son temps*, vol. I, p. 87.

Dans son ensemble, cette gamme a le caractère de la gamme mineure; seulement, le passage sur l'accord de sous-dominante agit d'une manière plus frappante que dans le mode mineur normal, où cet accord est lui-même mineur. Mais si l'on forme la cadence parfaite, les deux dominantes du ton donnent des accords majeurs, au milieu desquels l'accord de tonique est seul mineur. Or, c'est précisément dans la terminaison que l'effet produit est mauvais, lorsque l'accord final a une harmonie moins franche que les deux autres accords principaux du ton. Il faut donc transformer ces derniers en dissonnances bien marquées, s'il ne se produit pas ainsi une combinaison désagréable. Mais si, à la manière des anciens auteurs, on termine sur l'accord majeur, le caractère de la cadence devient tout à fait celui du mode majeur. Ou bien encore, comme dans le système du plain-chant, on peut toujours changer le *si* en *si*♭, ce qui rend mineur l'accord de sous-dominante du mode de quarte; il est possible aussi de garantir le mode de septième dans sa cadence contre l'invasion du mode majeur; mais alors on retombe exactement sur l'ancienne cadence mineure.

Sébastien Bach, dans la cadence de ce mode, introduit la sixte majeure, note caractéristique, dans d'autres accords, et évite ainsi l'accord majeur de la sous-dominante. Très-ordinairement, il emploie la sixte majeure comme quinte de l'accord de septième sur la seconde du ton, comme dans les exemples qui suivent. Le n° 1 est la fin du choral « Was mein Gott will, das gescheh' allzeit » dans la passion de Matthieu. Le n° 2 est la fin de l'hymne *Veni Redemptor gentium*, terminant la cantate : « Schwingt freudig Euch empor zu den erhabenen Sternen. » Dans tous les deux, la tonique est si, et la sixte majeure sol♮.



On trouve beaucoup d'autres exemples analogues; Bach s'écarte évidemment là de la forme régulière de la terminaison.

Quand les compositeurs modernes veulent employer un mode intermédiaire entre le majeur et le mineur, au moins pour certaines phrases mélodiques ou cadences isolées, ils aiment mieux, en général, placer l'un des accords mineurs du ton sur la sous-dominante et non sur la tonique. C'est ce qu'Hauptmann appelle le mode majeur-mineur; il comprend les accords suivants :

fa — $\overline{la}\flat$ — *ut* — $\underline{mi}$ — *sol* — $\underline{si}$ — *ré*.

Nous avons ici une sensible dans l'accord de dominante, une terminaison bien franche dans l'accord majeur de tonique, et la tendance vers le mineur peut encore se manifester sans altération dans l'accord de sous-dominante. Pour l'harmonie, ce mode majeur-mineur est certainement beaucoup plus commode que l'ancien mode de septième. Mais il ne peut s'adapter au chant homophone, à moins de changer le $\overline{la}\flat$ en *la*, en montant; autrement, il faudrait exécuter l'intervalle difficile $\overline{la}\flat$ — $\underline{si}$. Les anciens modes dérivent tous du chant homophone auquel le mode de septième convient parfaitement bien, quoiqu'il forme encore aujourd'hui notre gamme mineure ascendante.

Tandis que le mode de septième flotte incertain entre le majeur et le mineur et ne peut être exécuté suivant la logique, le mode de sixte (dorien des Grecs, phrygien du plain-chant) présente, grâce à la seconde mineure, un caractère tout particulier qui le distingue de tous les autres. Cette seconde mineure joue mélodiquement, par rapport à la tonique, le rôle d'une sensible ; elle réclame seulement un mouvement descendant. Mélodiquement parlant, ce mode est aussi favorable au mouvement descendant, que le mode majeur au mouvement ascendant : la seconde mineure est l'alliée la plus éloignée de la tonique. Son affinité avec elle s'obtient au moyen de la sous-dominante ; le mode ne peut former un accord de dominante sans sortir de ses limites. En prenant pour tonique *mi*, il présente la suite d'accords :

$\underline{ré}$ — *fa* — $\underline{la}$ — *ut* — $\underline{\underline{mi}}$ — *sol* — $\underline{\underline{si}}$ — *ré* ;

mais ici, les accords $\underline{ré}$ — *fa* — $\underline{la}$ et *fa* — $\underline{la}$ — *ut* ne sont pas directement alliés à l'accord de tonique, et le son *fa* ne peut entrer dans aucun accord consonnant qui ait avec l'accord de tonique une affinité directe. Comme le *fa* est précisément la seconde mineure caractéristique du mode, les accords dont il est question plus haut, ne peuvent

pas ne pas apparaître, au moins une fois, dans la cadence. Par conséquent, tandis qu'il existe une étroite affinité entre les termes consécutifs de la série des accords, certains termes indispensables de cette série n'ont avec l'accord de tonique qu'une parenté éloignée. En outre, dans le cours d'une phrase écrite en ce mode, il sera toujours nécessaire de prendre pour accord de dominante *si* — *ré*♯ — *fa*♯, quoiqu'il présente deux sons originairement étrangers à la gamme, pour ne pas laisser s'établir l'impression que le *la* est la tonique, et *la* — *ut* — *mi*, l'accord de tonique. Il en résulte que le mode de sixte doit être encore plus illogique en harmonie, encore moins bien coordonné que le mode mineur, bien que, sous le rapport mélodique, il soit parfaitement justifiable dans toutes ses parties. Il contient trois accords mineurs essentiels, savoir : l'accord de tonique *mi* — *sol* — *si*, de sous-dominante *la* — *ut* — *mi*, et celui qui renferme les deux sons faiblement alliés à la tonique, *ré* — *fa* — *la*. C'est donc exactement l'opposé du mode majeur ; celui-ci est ordonné dans sa construction par rapport à la dominante, le mode de sixte par rapport à la sous-dominante.

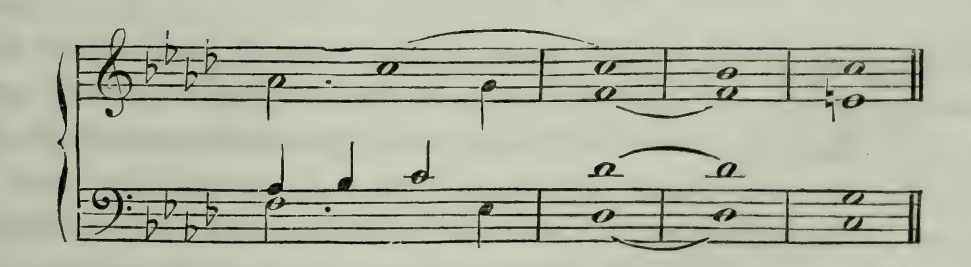
Majeur..... *fa* — *la* — *ut* — *mi* — *sol* — *si* — *ré*

Dorien..... *si*♭ — *ré*♭ — *fa* — *la*♭ — *ut* — *mi*♭ — *sol*.

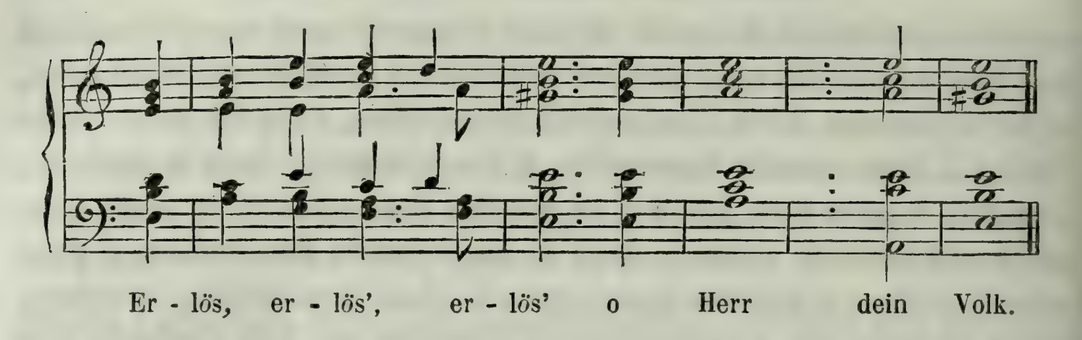
La différence harmonique repose sur cette circonstance que les alliés, introduits dans la gamme par la sous-dominante *fa*, c'est-à-dire le *si*♭ et le *ré*♭, ne rentrent pas dans le son de cette note, comme le font le *si* et le *ré* par rapport à la dominante qui les rattache au ton, et que l'accord de tonique est toujours placé du côté de la dominante. Il en résulte que, dans l'enchaînement harmonique, on ne peut rattacher le *si*♭ et le *ré*♭, soit à la tonique, soit à l'accord de tonique, aussi étroitement qu'on peut le faire avec les sons complémentaires alliés à la dominante. Par suite, le mode de sixte, en harmonie, présente le caractère du mode mineur, exalté, en quelque sorte, dans une certaine mesure. Ses sons, ses accords sont reliés entre eux, mais beaucoup moins clairement, beaucoup moins nettement que ceux du mode mineur. Les accords qui peuvent s'y succéder sans enfreindre les rapports avec la tonique *mi*, sont d'une part *ré* mineur et *fa* majeur, et d'autre part *si* majeur, accords qui, en majeur, ne pourraient s'employer ensemble que dans des modulations hardies. Le

caractère esthétique du mode de sixte s'accorde avec ces résultats ; il convient admirablement bien aux sentiments mystérieux, mystiques, ou à l'expression de la plus grande prostration, celle où toute association d'idées semble impossible, à l'accablement dans la douleur. Comme, d'autre part, grâce à la sensible descendante, ce mode présente une certaine énergie dans le mouvement descendant, il peut aussi exprimer le sublime dans la gravité, dans la puissance, et même, par la réunion des accords majeurs étrangers qui font partie du système, admettre une sorte de magnificence particulière, de richesse de couleurs remarquable.

Quoique le mode de sixte ait disparu de la théorie ordinaire de l'harmonie, il a laissé, dans la pratique musicale, des traces beaucoup plus manifestes que les autres anciens modes, parmi lesquels le mode de quarte s'est fondu avec le mode majeur, et le mode de septième ainsi que le mode de tierce avec le mode mineur. On ne peut, il est vrai, faire un usage trop fréquent d'une gamme analogue à celle qui vient d'être décrite : pour de longues phrases, ce mode ne présente pas des liaisons suffisamment puissantes, mais l'expression particulière qu'il communique aux endroits où il se montre, ne peut être remplacée par aucune autre. Il se manifeste nettement, en général, par sa cadence particulière, qui va de la seconde mineure au son fondamental. Chez Hændel, on trouve encore la cadence naturelle du système employée avec un grand effet. On citera, comme exemple, la fugue grandiose du *Messie :* « And with his stripes we are healed » qui porte l'armure du ton de *fa* mineur, mais qui, par l'emploi fréquent de l'harmonie de septième sur le *sol*, accuse l'*ut* comme véritable tonique. C'est la pure cadence dorienne que celle qui suit :



De même, dans le *Samson*, le chœur « Hör Jacob's Gott », qui caractérise d'une manière très-belle, dans la gamme dorienne de *mi*, la prière des Israélites dévorés d'angoisse, par opposition aux chants des sacrificateurs philistins qui suivent immédiatement, en *sol* majeur. Ici encore, la cadence est purement dorienne :



Le chœur des Israélites qui ouvre la troisième partie : « Im Donner komm o Gott herab, » et qui se tient principalement en *la* mineur, a cependant une phrase intermédiaire écrite en mode dorien.

Sébastien Bach aussi, dans les *chorals* harmonisés par lui, dont la mélodie appartient au mode de sixte, a maintenu l'harmonie dans ce mode, tant que le texte réclame une expression douloureuse, par exemple, dans le *De profundis* ou « Aus tiefer Noth schrei ich zu Dir, » plus loin dans l'air de Paul Gerhardt : « Wenn ich einmal soll scheiden, so scheide nicht von mir, » tandis que, pour d'autres textes, par exemple « Befiel Du deine Wege, » « O Haupt voll Blut und Wunden, » etc., il harmonisait les mêmes mélodies en majeur ou en mineur, la mélodie se terminant alors sur la tierce ou la quinte du ton, au lieu de la tonique dorienne.

Dans l'air de Pamina au deuxième acte de la *Flûte enchantée*, Mozart a employé le mode dorien ; Fortlage l'a déjà remarqué (1). Un des plus beaux exemples du contraste entre le mode dorien et le mode majeur, se trouve dans le sextuor du second acte de *Don Juan*, à l'entrée d'Ottavio et de Donna Anna. Ottavio chante des paroles de consolation :

Tergi il ciglio, o vita mia,
E dà calma al tuo dolore

en *ré* majeur, mais le motif emprunte une couleur particulière à la tendance vers la sous-dominante comme dans le mode de quarte, quoiqu'il n'y tombe pas nettement. Donna Anna, profondément affligée, lui succède, dans une forme mélodique tout à fait semblable, avec le même accompagnement, et son chant, après une courte modulation en *ré* mineur, s'établit définitivement dans le mode dorien d'*ut* :

Sola morte, o mio tesoro,
Il mio pianto può finir.

Le contraste entre l'émotion douce et l'anéantissement de la dou-

(1) Eckert cite des exemples de phrases instrumentales dans son écrit : « *Die Principien der Modulation und musikalischen Idee.* » Heidelberg, 1860, p. 12.

leur, est ici marqué de la manière la plus admirable par le changement du mode. Le trio de la mort du Commandeur, à la fin de l'introduction de *Don Juan*, se termine par une cadence dorienne. Il en est de même de l'*Agnus Dei* du Requiem de Mozart, où cependant on n'est pas certain que l'auteur ait écrit lui-même la fin.

Dans la musique de Beethoven, on pourrait désigner la première partie de la sonate, Op. 90, en *mi* mineur, comme une de celles qui empruntent un caractère particulier à la fréquente répétition de la cadence dorienne, et par contraste avec laquelle la seconde partie, écrite en majeur, paraît avoir une expression d'autant plus suave.

Les compositeurs modernes font fréquemment usage d'une cadence qui appartient au mode de sixte, avec la seconde mineure et la septième majeure, dans ce qu'on appelle l'accord de sixte augmentée : *fa* — *la* — *ré*♯, où le *fa* comme le *ré*♯ ne sont séparés de la tonique *mi* que par un demi-ton. Cet accord ne peut être déduit ni du mode majeur ni du mode mineur, aussi beaucoup de théoriciens modernes l'ont-ils considéré comme une énigme inexplicable. Il s'explique néanmoins facilement comme étant un reste de l'ancien mode de sixte, où l'on a réuni la septième majeure *ré*♯ de l'accord de dominante *si* — *ré*♯ — *fa*♯, aux sons *fa* — *la* se rattachant à la sous-dominante.

Ces exemples peuvent suffire à prouver qu'il s'est conservé même dans la musique moderne, certains restes du mode de sixte. En cherchant, il serait facile d'en trouver encore beaucoup d'autres. Les enchaînements d'accords que fournit ce mode, ne sont ni assez déterminés, ni assez nets, pour qu'on puisse les employer à la construction de phrases d'une certaine étendue ; dans les phrases courtes, au contraire, dans les *chorals*, dans les transitions rapides et les périodes mélodiques d'une œuvre musicale de longue haleine, il donne une expression d'une puissance telle qu'on n'aurait pas dû l'oublier dans les théories modernes, d'autant plus que Hændel, Bach, Mozart en ont fait usage, et aux endroits les plus saillants de leurs œuvres.

Il en est de même d'ailleurs des modes de quarte et de septième, quoique tous deux soient moins nettement distincts l'un du mode majeur, l'autre du mode mineur. Ils sont cependant toujours à même d'imprimer un caractère particulier à certaines périodes musicales, quoiqu'il soit difficile d'utiliser logiquement leurs propriétés dans de longues phrases. On peut d'ailleurs retrouver les résultats harmoniques fournis par ces deux modes, sans sortir des limites des systèmes majeur et mineur actuellement usités. Ce serait pourtant faciliter la compréhension théorique de certaines modulations, que de donner l'idée de ces modes et de l'harmonie qui leur est propre.

La supériorité des gammes modernes ne se manifeste donc que dans la musique harmonique, ainsi que le montre le développement historique, d'accord avec la théorie physiologique. Elles tirent leur origine du principe esthétique de la musique moderne, lequel consiste en ce que l'accord de tonique doit dominer dans la série des accords, suivant la même loi d'affinité que la tonique dans la gamme. Cette prédominance factice de ce principe a commencé dès le début du siècle dernier, depuis qu'on a senti la nécessité d'introduire régulièrement dans la cadence finale même l'accord mineur de tonique.

Le phénomène physiologique sur lequel repose ce principe, consiste en ce que les sons musicaux sont déjà, par eux-mêmes, des accords de sons partiels, et qu'inversement, dans certaines circonstances, les accords peuvent aussi représenter des sons. A cause de cela, dans tout accord de trois sons l'un de ceux-ci joue un rôle principal ; c'est celui dont l'accord peut être considéré comme la représentation. Dans la la pratique, ce principe a été depuis longtemps reconnu, c'est-à-dire aussitôt qu'on a commencé à terminer les phrases musicales par des accords à plusieurs parties. On a senti tout de suite qu'on pouvait superposer au son final l'octave, la quinte, et finalement la tierce majeure, mais non une quarte ni une sixte ; assez longtemps, on a repoussé la tierce mineure. Or, les trois premiers intervalles rentrent dans les éléments du son de la tonique placée à la basse ; il n'en est pas de même des trois derniers.

Théoriquement, c'est Rameau dans son *Traité d'Harmonie* qui a le premier reconnu la valeur diverse des sons dans un accord, bien qu'il en ignorât les causes que nous avons données. D'après nos explications, le son complexe représenté par l'accord est la *basse fondamentale*, le *son principal* qu'il ne faut pas confondre avec ce qu'on appelle ordinairement la *basse*, c'est-à-dire le son le plus grave. Dans tous ses renversements, l'accord majeur de trois sons a toujours la même basse fondamentale. C'est toujours *ut*, dans les accords *ut — mi — sol*, *mi — sol — ut*, ou *sol — ut — mi*. L'accord mineur *ré — fa — la*, également, n'a jamais comme son fondamental, dans tous ses renversements, que le *ré;* mais dans l'accord de sixte *fa — la — ré*, il peut aussi avoir le *fa* comme basse fondamentale ; c'est avec cette acception qu'il entre dans la cadence du ton d'*ut* majeur. Cette dernière différence a en partie échappé aux successeurs de Rameau ; mais ici le sentiment artistique de Rameau s'est trouvé tout à fait d'accord avec la nature des choses. Comme nous l'avons montré plus haut, l'accord mineur admet en effet cette double acception.

La différence essentielle des anciens et des nouveaux modes consiste

en ce que les premiers placent leurs accords mineurs sur la dominante, et les seconds sur la sous-dominante :

DANS		ACCORD DE		
		SOUS-DOMINANTE.	TONIQUE.	DOMINANTE.
L'ancien mode	de tierce......	mineur	mineur	mineur
	de septième....	majeur	mineur	mineur
	de quarte......	majeur	majeur	mineur
Le mode majeur..............		majeur	majeur	majeur
Le nouveau	majeur-mineur.	mineur	majeur	majeur
	mineur........	mineur	mineur	majeur

Les raisons de cette construction ont déjà été exposées plus haut.

CHAPITRE XVI

SYSTÈME DES TONS.

Au premier abord, rien ne fixe la hauteur de la tonique d'un morceau. Mais si l'on a des instruments ou des voix d'une étendue déterminée, pour exécuter différentes mélodies, différents morceaux, il faudra prendre la tonique à différentes hauteurs, selon que l'air s'élève au-dessus, ou descend au-dessous de la tonique. Cette note doit être placée à une hauteur telle, que le morceau soit compris tout entier dans les limites de la voix ou de l'instrument sur lequel il doit être exécuté. Cette considération pratique ne peut être éludée, et implique la possibilité de pouvoir placer le son fondamental d'un morceau à une hauteur quelconque.

En outre, dans un morceau un peu long, on éprouve le besoin de changer de temps en temps de tonique, c'est-à-dire de *moduler*, pour éviter la monotonie, et pour mettre à profit l'effet musical produit par le changement et le retour du ton primitif. De même que les dissonnances font ressortir les consonnances, leur donnent plus d'action, de même quelques excursions dans les tons voisins renforcent encore le sentiment de la tonalité dominante, ainsi que le bien-être qu'on y trouve. La variété d'effets obtenue au moyen des modulations est d'autant plus nécessaire dans la musique moderne, que l'ancien principe qui permettait de varier l'expression au moyen des divers modes, a dû disparaître ou du moins se renfermer entre des limites très-étroites. Les Grecs pouvaient librement choisir entre sept modes, le moyen âge entre cinq ou six, et nous seulement entre deux, le mode majeur et le mode mineur. Ces anciens modes comportaient une série variée de caractères, dont deux seulement sont encore restés à la disposition de la musique harmonique. En revanche, pour accroître la clarté et la solidité de construction d'une phrase harmonique, les modernes peuvent se permettre de plus grandes libertés dans les excursions en dehors du ton initial, et ouvrir par là, à la richesse des combinaisons musicales, un domaine nouveau qui n'était que très-peu accessible aux anciens.

Enfin je dois encore mentionner la question si souvent soulevée, de savoir si les différents tons ont, par eux-mêmes, des caractères différents.

Dans un même morceau de musique, des modulations dans les divers tons d'affinité plus ou moins grande, du côté de la sous-dominante ou de la sus-dominante, font un effet très-différent; c'est bien évident. Mais ce n'est que par opposition à la tonalité principale établie dès le principe. Ce ne serait là qu'un caractère *relatif*. La question dont il s'agit ici consiste à savoir si, indépendamment de leur comparaison avec une autre tonalité, les tons présentent un caractère *absolu* distinct. — On l'a souvent prétendu, mais il est difficile d'apprécier le degré d'exactitude de cette assertion et le sens particulier qu'il faut y attacher, parce que, sous un même nom, on a peut-être réuni des choses très-différentes ; on n'a pas tenu compte, notamment, des différences dues à la diversité des instruments. Si un instrument à sons fixes est accordé suivant le tempérament égal, tous les demi-tons, dans toute l'étendue de la gamme, ont la même valeur; tous les sons ont le même timbre ; il n'y a donc aucune raison pour que des morceaux écrits en divers tons présentent des caractères différents, et des musiciens dignes de foi m'ont aussi affirmé qu'on ne remarquait pas la diversité du caractère des tons sur l'orgue, par exemple. Hauptmann (1) en dit autant, avec raison je crois, du chant avec ou sans accompagnement. Tout au plus peut-il arriver, par une notable variation dans la hauteur de la tonique, que tous les sons aigus deviennent trop criards, ou tous les sons graves trop ternes.

En revanche, sur le piano et les instruments à archet, les divers caractères des tons sont nettement tranchés. La gamme d'*ut* majeur et sa voisine, celle de *ré*♭ majeur sonnent différemment. On peut facilement s'assurer que cette différence ne dépend pas de la hauteur absolue, en comparant deux instruments accordés à des hauteurs différentes. Le *ré*♭ de l'instrument le plus grave est à l'unisson de l'*ut* de l'instrument le plus aigu, et cependant les deux tons d'*ut* majeur conservent leur harmonie claire et énergique, ceux de *ré*♭ majeur leur caractère doux et voilé. A peine ici pourrait-on supposer que l'attaque des touches noires du piano, plus courtes et plus étroites, ne donne pas tout à fait le même timbre que l'attaque des touches blanches, et que le caractère varie suivant le plus ou moins d'énergie ou de douceur du son des différents intervalles du ton. Vient-il s'ajouter à cela les différences à peu près régulières dans la hauteur des quintes que les accordeurs accordent en dernier lieu, et sur lesquelles se concentrent les erreurs commises sur toutes les autres quintes de la série? Je n'ose le décider par expérience.

Sur les instruments à archet, ce sont les cordes à vide qui se dis-

(1) *Harmonik und Metrik*, p. 188.

tinguent par leur timbre énergique, et, peut-être aussi, les différences dans le son des cordes plus ou moins raccourcies, qui peuvent faire varier le caractère des tons, suivant qu'ils tombent sur tels ou tels dégrés de la gamme. Cette hypothèse a été confirmée pour moi par les réponses que m'ont faites des musiciens, lorsque je leur demandais comment ils reconnaissaient le ton dans certains cas déterminés. A cela viennent s'ajouter les irrégularités dans la hauteur. Les quintes des cordes à vide sont des quintes naturelles. Or, toutes les autres quintes ne peuvent être naturelles si, en jouant dans les divers tons, on donne toujours la même valeur à tous les sons, résultat auquel vise le plus ordinairement l'enseignement actuel du violon. Par conséquent, les gammes dans les différents tons peuvent présenter des différences de structure, qui doivent naturellement exercer une influence encore beaucoup plus essentielle sur le caractère de la mélodie.

Pour la majorité des instruments à vent, les différences de timbre des différentes notes sont encore plus grandes.

Si cette manière de voir est exacte, le caractère des tons devrait beaucoup varier avec les différents instruments, et c'est aussi ce qui arrive, à ce que je crois. C'est là cependant encore un point qui ne peut être décidé que par l'oreille très-délicate d'un musicien, lorsqu'on attire son attention sur la question soulevée.

Il ne serait pas impossible d'ailleurs, que, par une particularité de l'oreille humaine dont j'ai déjà parlé plus haut, p. 147, le caractère des tonalités présentât aussi certains traits communs, indépendants de la différence des instruments, et tenant seulement à la hauteur absolue de la tonique. Le sol_5 est, en effet, un son propre de l'oreille humaine, et sonne, par conséquent, d'une manière particulièrement éclatante, même sans résonnateur ; le $fa\sharp_5$ et le $la\flat_5$ présentent encore un peu de ce mordant. A un degré moindre, les sons qui renferment ce sol_5 parmi leurs éléments ont un timbre un peu plus éclatant, plus mordant que leurs voisins ; on citera le sol_4, l'ut_4 et le sol_3. Il peut ne pas être indifférent, dans un morceau en *ut* majeur, que la quinte sol_3 et la tonique ut_4 présentent ce mordant supérieur à celui des autres sons, mais, en tout cas, ce ne sont que de faibles différences, et je dois provisoirement laisser de côté la question de savoir si elles doivent entrer en considération.

Par suite de toutes ces raisons, ou au moins de quelques-unes, il est nécessaire de laisser aux musiciens toute liberté dans le choix de la hauteur de la tonique ; déjà les anciens Grecs transposaient leurs gammes à tous les degrés de l'échelle chromatique. Pour les chanteurs, des transpositions de ce genre n'offrent absolument aucune difficulté ; ils peuvent commencer par un son fondamental quelconque, et trou-

vent partout, dans leur voix, les intervalles qui suivent. Mais la chose était plus difficile pour les instruments, notamment pour ceux qui n'ont que des sons fixes. La difficulté ne disparaît pas absolument, même pour les instruments qui, comme ceux à archet, peuvent, il est vrai, émettre un intervalle quelconque, mais dans l'étude desquels l'artiste a été instruit à un exercice mécanique des doigts, pour jouer juste, et n'est parvenu que par une longue éducation à donner exactement le son que réclame son oreille.

Néanmoins, même pour les instruments, le système grec n'offrait pas encore des difficultés insurmontables, tant qu'on ne modulait pas dans des tons éloignés et qu'on se contentait d'un petit nombre de signes. Jusqu'au début du dix-septième siècle, on se contentait de deux signes pour désigner le *si*♭ et le *mi*♭, et du signe♯ pour *fa*♯, *ut*♯, *sol*♯, pour avoir les sensibles des toniques *sol*, *ré* et *la*. Mais on évitait l'emploi des sons enharmoniques correspondants *ré*♯, *la*♯, *la*♭, *ré*♭, *sol*♭. Par la substitution du *si*♭ au *si*, on pouvait transposer toute gamme à la sous-dominante, et on ne faisait pas d'autre transposition.

Dans le système pythagoricien qui a maintenu son empire dans la théorie jusqu'à Zarlino au seizième siècle, on n'accordait que par quintes, par conséquent, en montant à partir d'*ut* :

ut sol ré la mi si fa♯ *ut*♯ *sol*♯ *ré*♯ *la*♯ *mi*♯ *si*♯.

Si nous montons toujours de deux quintes et que nous descendions d'une octave, l'intervalle ainsi obtenu sera égal à $\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{9}{8}$, c'est-à-dire une seconde majeure. On a ainsi les notes :

ut	*ré*	*mi*	*fa*♯	*sol*♯	*la*♯	*si*♯
1	$\frac{9}{8}$	$\left(\frac{9}{8}\right)^2$	$\left(\frac{9}{8}\right)^3$	$\left(\frac{9}{8}\right)^4$	$\left(\frac{9}{8}\right)^5$	$\left(\frac{9}{8}\right)^6$.

En descendant par quintes, à partir d'*ut*, nous obtenons la série

ut fa si♭ *mi*♭ *la*♭ *ré*♭ *sol*♭ *ut*♭ *fa*♭ *si*♭♭ *mi*♭♭ *la*♭♭ *ré*♭♭.

En descendant toujours de deux quintes et remontant d'une octave, nous obtenons les sons

ut	*si*♭	*la*♭	*sol*♭	*fa*♭	*mi*♭♭	*ré*♭♭
1	$\frac{8}{9}$	$\left(\frac{8}{9}\right)^2$	$\left(\frac{8}{9}\right)^3$	$\left(\frac{8}{9}\right)^4$	$\left(\frac{8}{9}\right)^5$	$\left(\frac{8}{9}\right)^6$.

Or, l'intervalle $\left(\frac{8}{9}\right)^6 = \frac{262144}{531441} = \frac{1}{2} \cdot \frac{524288}{531441}$; pour abréger :

$$\left(\frac{8}{9}\right)^6 = \frac{1}{2} \cdot \frac{73}{74};$$
$$\left(\frac{9}{8}\right)^6 = 2 \cdot \frac{74}{73}.$$

Par conséquent, le *si*♯ est plus haut que l'octave supérieure d'*ut* du faible intervalle $\frac{74}{73}$, et le *ré*♭ plus bas, de la même quantité, que l'octave inférieure d'*ut*. Si maintenant, partant de *ut* et de *ré*♭, nous procédons par quintes naturelles, nous trouvons la même différence constante entre

ut	et	*ré*♭
sol	»	*la*♭♭
ré	»	*mi*♭♭
la	»	*si*♭♭
mi	»	*fa*♭
si	»	*ut*♭
fa♯	»	*sol*♭
ut♯	»	*ré*♭
sol♯	»	*la*♭
ré♯	»	*mi*♭
la♯	»	*si*♭
mi♯	»	*fa*
si♯	»	*ut*.

Les sons de gauche sont tous plus hauts de $\frac{74}{73}$ que ceux de droite. Notre notation, dont les principes se sont développés encore avant la fixation du système moderne, a conservé les différences respectives entre les notes de droite et les notes de gauche. Mais, dans la pratique, il était incommode, sur les instruments à sons fixes de distinguer des intervalles aussi rapprochés, et on chercha à les faire disparaître. Après beaucoup d'essais informes, où l'on altérait plus ou moins certains intervalles pour conserver aux autres leur justesse, ce qu'on appelait le *tempérament inégal*, on fut conduit au système du *tempérament égal* où l'octave est divisée en douze intervalles exactement égaux. Nous avons vu que, en montant de 12 quintes naturelles, on arrive de l'*ut* à un *si*♯ qui ne diffère de l'*ut* que d'environ le $\frac{1}{5}$ d'un demi-ton, de l'intervalle $\frac{74}{73}$. De même, en descendant de 12 quintes, on arrive au *ré*♭♭ qui est au-dessous de l'*ut* de la même quantité. Si donc on pose *ut* = *si*♯ = *ré*♭♭, et qu'on répartisse régulièrement la petite erreur de $\frac{74}{73}$ sur les 12 quintes de chaque quinte ascendante ou montante, chacune d'elles sera altérée d'environ $\frac{1}{60}$ de demi-ton, différence très-petite. On ramène ainsi les divers sons à 12 degrés par octave, comme nous les avons dans nos modernes instruments à clavier. Réduite à ses termes les plus simples, la quinte du tempérament égal est approximativement $\frac{3}{2} \cdot \frac{885}{886}$. Par le fait, sa substitution à la quinte naturelle ne pourra souffrir de difficultés que dans des cas très-rares. La combinaison du son fondamental et

de sa quinte tempérée, résonnant simultanément, donne un battement dans le temps où la quinte fait 442,5 vibrations. Comme le la_2 fait 440 vibrations à la seconde, la quinte tempérée $ré_2$ — la_2 fait assez exactement un battement par seconde. On pourrait déjà en reconnaître l'existence pour des sons longuement prolongés, mais alors la consonnance n'est presque pas altérée ; dans un mouvement rapide, des battements de ce genre n'ont pas le temps de se produire. L'effet est encore moins sensible dans les régions graves, où les nombres des battements diminuent dans le même rapport que les nombres absolus de vibrations. Dans les régions aiguës, au contraire, les battements deviennent plus sensibles, $ré_4$ — la_4 donne 4 battements, et la_4 — mi_5 6 par seconde ; néanmoins, à cette hauteur, les accords sont rarement tenus, et ne se présentent en général que dans un mouvement rapide.

La quarte du tempérament est exprimée par $\frac{4}{3} \cdot \frac{886}{885}$. Il se produit un battement dans le temps où le son grave de la quarte fait 221,25 vibrations. La quarte la_1 — $ré_2$ fait donc un battement par seconde, ainsi que la quinte $ré_2$ — la_2. Par conséquent, les consonnances naturelles que renferme le système pythagoricien, ne sont altérées par le tempérament, que d'une quantité qui peut à peine être prise en considération.

Dans la suite mélodique des sons, l'intervalle $\frac{885}{886}$ est à peu près à la limite des différences de hauteur perceptibles. D'après les recherches de Weber, cette limite est de $\frac{1000}{1001}$ pour des violonistes exercés. Mais, dans les assemblages de sons simultanés, on peut, grâce aux battements, apprécier des différences encore plus faibles.

Les tierces et les sixtes du tempérament se rapprochent, plus que les intervalles pythagoriciens correspondants, des intervalles naturels.

INTERVALLES.	NATURELS.	TEMPÉRÉS.	PYTHAGORICIENS.
Tierce majeure....	$\frac{5}{4}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{127}{126}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{81}{80}$
Sixte mineure.....	$\frac{8}{5}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{126}{127}$	$\frac{8}{5} \cdot \frac{80}{81}$
Tierce mineure....	$\frac{6}{5}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{121}{122}$	$\frac{6}{5} \cdot \frac{80}{81}$
Sixte majeure.....	$\frac{5}{3}$	$\frac{5}{4} \cdot \frac{122}{121}$	$\frac{5}{3} \cdot \frac{81}{80}$
Demi-ton.........	$\frac{16}{15}$	$\frac{18}{17}$ ou $\frac{16}{15} \cdot \frac{147}{148}$	$\frac{21}{20}$ ou $\frac{16}{15} \cdot \frac{80}{81}$

Les dissonnances dues aux harmoniques dans les tierces tempérées, sont donc un peu plus douces que dans les tierces pythagoriciennes, mais les sons résultants sont bien plus désagréables encore.

Les tierces pythagoriciennes ut_2 — mi_2 et $\underline{mi}_2$ — $\underline{sol}_2$, donnent, comme sons résultants, $ut\sharp_0$ et $\underline{si}_{-1}$, différant tous deux d'un demi-ton du son résultant ut_0, que donneraient les deux tierces dans la gamme naturelle. Dans l'accord mineur mi_2 — sol_2 — si_2, les sons résultants fournis par les tierces pythagoriciennes sont si_{-1} et $sol\sharp_0$; le si_{-1} s'adapte bien à l'accord, mieux même que le son résultant ut_0 que donnerait la gamme naturelle. Le second son résultant, le $sol\sharp$, au contraire, appartient non à l'accord mineur, mais à l'accord majeur de *mi*. Mais comme, dans la gamme naturelle, un des deux sons résultants ut_0 et sol_0 est faux, la gamme pythagoricienne ne présente pas précisément d'infériorité sous ce rapport. Les sons résultants des tierces tempérées sont intermédiaires entre ceux des tierces naturelles et ceux des tierces pythagoriciennes, à moins d'un demi-ton des premiers; ils ne correspondent, par conséquent, à aucune modulation admissible, à aucun son de l'échelle chromatique, à aucune dissonnance qui puisse se produire dans la marche d'une mélodie quelconque; aussi ne sont-ils que faux et discordants.

Ces mauvais sons résultants ont toujours été, pour moi, le défaut le plus saillant de l'harmonie des intervalles tempérés; si, notamment dans les régions aiguës, on exécute des passages en tierces pas trop rapides, ils forment une sorte de basse fondamentale abominable, qui est d'autant plus désagréable qu'elle est assez voisine de la véritable basse, et sonne comme si elle était exécutée sur un instrument tout à fait faux. C'est surtout frappant sur l'harmonium et le violon. Tout musicien, tout dilettante exercé, s'en aperçoit aussitôt que son attention est appelée là-dessus. Une fois qu'on s'est exercé à entendre cette basse fausse, elle ressort même sur le piano. Dans le système pythagoricien, les sons résultants font plutôt l'effet de dissonnances exécutées à dessein. De ces deux maux, quel est le moindre? C'est ce que je n'ose pas décider.

Dans les régions graves, où l'on n'entend que difficilement ou même pas du tout les sons résultants, parce qu'ils sont trop bas, les tierces tempérées ont l'avantage sur les pythagoriciennes, parce qu'elles sont moins dures, et donnent moins de battements. Dans les régions aiguës, au contraire, la supériorité passe peut-être de l'autre côté à cause des sons résultants. En tout cas, cependant, le système tempéré est à même de fournir tous les résultats que donnait le système pythagoricien, et cela avec des moyens moins compliqués.

C.-E. Naumann (1), qui a défendu récemment le système pythagoricien contre le tempérament égal, appuie principalement son argumentation sur ce que les demi-tons qui, dans la résolution de l'accord de trois sons, séparent la sensible de la tonique, et la septième mineure descendante de la tierce du ton, sont des intervalles plus petits, $\frac{21}{20}$, que dans le tempérament, où ils atteignent $\frac{18}{17}$; c'est dans la gamme naturelle, qu'ils prennent la plus grande valeur, $\frac{16}{15}$. Tandis que, dans le tempérament, il n'y a, entre le *fa* et le *sol*, qu'un seul son qui tient lieu tantôt de la sensible *fa*♯ pour le *sol*, tantôt de la septième *sol*♭ descendant sur le *fa*, dans le système pythagoricien, au contraire, le *sol*♭ est un peu plus bas que le *fa*♯; le demi-ton incline donc du côté vers lequel il doit se résoudre dans une marche régulière, et la hauteur variable indique le sens de la résolution. Mais, quoique le demi-ton joue un rôle important dans la modulation, il est cependant bien évident, que nous ne sommes pas autorisés à modifier arbitrairement les intervalles dont il s'agit, uniquement pour les rapprocher davantage de leur résolution. Autrement, nous rapprocherions toujours de plus en plus le demi-ton de sa résolution, au delà de toute limite, comme dans le mode enharmonique des Grecs. Au reste, si l'on élève le demi-ton pythagoricien, qui représente à peu près les $\frac{4}{5}$ du demi-ton naturel, aux $\frac{3}{5}$ environ de ce dernier intervalle $\left(\frac{16}{15}\cdot\frac{80}{18}\cdot\frac{80}{81}\right)$, la sensible ainsi obtenue sonne déjà d'une manière tout à fait désagréable. Nous avons déjà vu plus haut, que le caractère de la sensible dépend essentiellement de ce que c'est le son de la gamme qui a le moins d'affinité avec la tonique, et dont, par suite, la hauteur est le moins déterminée, peut le mieux être modifiée d'une petite quantité. C'est donc précisément sur ce son que nous pouvons le moins appuyer le principe de la construction de notre gamme.

Le défaut capital de notre système tempéré actuel ne réside donc pas dans les quintes; elles ne sont altérées, en effet, que d'une quantité insignifiante, à peine sensible même dans les accords. Il est plutôt dans les tierces, et encore ne vient-il pas de ce que les tierces sont déterminées au moyen d'une série de quintes fausses, mais plutôt de l'ancienne erreur du système pythagoricien, où les tierces sont déterminées au moyen d'une série de quatre quintes ascendantes. Les quintes naturelles sont même ici plus mauvaises que les autres. L'affinité naturelle de la tierce, pour la tonique, repose sur le rapport numérique $\frac{5}{4}$, aussi bien dans la mélodie que dans l'harmonie. Toute autre tierce ne peut être qu'un succédané plus ou moins incomplet de

(1) *Ueber die verschiedenen Bestimmungen der Tonverhältnisse*. Leipzig, 1858.

la tierce naturelle. Le seul système véritablement exact est celui, proposé par Hauptmann, qui distingue les sons engendrés par quintes, des sons engendrés par tierces. Comme il est important, dans un grand nombre de questions théoriques, de pouvoir faire des observations sur des sons faisant entre eux les intervalles que réclame la théorie, pour ne pas être induit en erreur par l'imperfection du tempérament, j'ai cherché à construire un instrument qui permît de moduler dans tous les tons par intervalles naturels.

S'il nous fallait effectivement reproduire, dans toute sa pureté, le système des sons que distingue Hauptmann, pour avoir des intervalles naturels dans tous les tons, il serait presque impossible de surmonter les difficultés du problème. Heureusement, on peut introduire une très-grande et très-essentielle simplification, au moyen de l'artifice que nous avons trouvé à l'origine de la musique arabe-persane, et que nous avons déjà expliqué plus haut.

Nous avons vu que les sons, engendrés par quintes du système d'Hauptmann, et désignés par *ut* — *sol* — *ré* — *la*, etc., étaient respectivement plus élevés de $\frac{81}{80}$, ou un comma pythagoricien, que les sons de même nom $\underline{ut}$ — $\underline{sol}$ — $\underline{ré}$ — $\underline{la}$, engendrés par tierces. Nous avons vu, en outre, qu'en partant de *si* et descendant de douze quintes jusqu'en *ut*♭, ce dernier son, replacé à l'octave convenable, est plus grave que le *si* de l'intervalle $\frac{74}{73}$. On a donc :

$$si : \underline{si} = 81 : 80$$
$$si : ut = 74 : 73.$$

Ces deux intervalles sont très-voisins ; $\underline{si}$ est un peu plus haut que *ut*♭, mais seulement dans le rapport :

$$ut\flat : \underline{si} = 5913 : 5920$$

ou, approximativement, en réduisant les termes :

$$ut\flat : \underline{si} = 845 : 846.$$

La différence entre l'*ut*♭ et le $\underline{si}$ est donc à peu près aussi grande qu'entre la quinte naturelle et la quinte tempérée du même son.

Or le $\underline{si}$ est la tierce naturelle de *sol;* redescendons par quintes du *sol* à l'*ut*♭ :

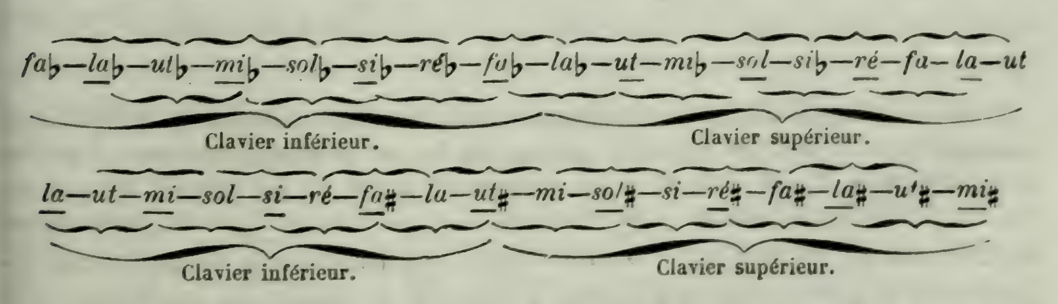
sol — *ut* — *fa* — *si*♭ — *mi*♭ — *la*♭ — *ré*♭ — *sol*♭ — *ut*♭

Nous obtiendrons ainsi huit intervalles de quintes.

En les faisant toutes un peu trop grandes de $\frac{1}{8}$ du très-petit intervalle $\frac{846}{845}$, nous ferons coïncider l'*ut*♭ avec le *si*. Or, comme l'intervalle $\frac{846}{845}$ est déjà sur la limite des différences de hauteur perceptibles, le huitième de cet intervalle est tout à fait négligeable, et nous pouvons, par conséquent, identifier les sons suivants avec ceux d'Hauptmann, en procédant par quintes à partir de *ut*♭ = *si*.

fa♭ = *mi*
ut♭ = *si*
sol♭ = *fa*♯
ré♭ = *ut*♯
la = *sol*♯
mi♭ = *ré*♯
si♭ = *la*♯.

Parmi tous les instruments, c'est sur l'harmonium, à cause de la tenue régulière des sons, du mordant de leur timbre et de la netteté assez grande des sons résultants, que se font le plus sentir les effets de l'inexactitude des intervalles. Mais, d'autre part, ses anches peuvent être accordées d'une manière très-précise, très-durable, en sorte que cet instrument m'a paru particulièrement favorable aux expériences sur la gamme naturelle. J'ai donc fait adapter, sur un harmonium grand format (1), deux claviers, et pour chacun, un registre d'anches accordées, de manière à me permettre d'exécuter, au moyen des sons des deux claviers, les accords majeurs, de *fa*♭ majeur à *fa*♯ majeur, dans la gamme naturelle. Les sons se répartissent ainsi qu'il suit :



L'instrument donne donc quinze accords majeurs et autant d'accords mineurs, dans lesquels les tierces majeures sont tout à fait justes, et les quintes trop hautes de $\frac{1}{8}$ de l'intervalle dont elles sont trop basses dans le tempérament. Dans le clavier inférieur, on a la gamme complète d'*ut*♭ majeur et de *sol* majeur ; dans le clavier supérieur, celle de *mi*♭ majeur et de *si* majeur. On a surtout la série complète

(1) Par MM. J. et P. Schiedmayer, de Stuttgart.

des gammes majeures entre *ut*♭ majeur et *si* majeur ; et on peut toutes les exécuter dans leur véritable forme ; si l'on veut, au contraire, moduler au delà de *si* majeur ou *ut*♭, il faut faire un véritable échange en harmonique, entre *si* et *ut*♭, ce qui élève sensiblement la hauteur (d'un comma $\frac{81}{80}$). Comme gammes mineures, on a complétement, sur le clavier inférieur, celle de *si* ou d'*ut*♭ mineur, sur le clavier supérieur, celle de *ré*♯ ou *mi*♭ mineur (1).

Pour les gammes mineures, la série des notes n'est pas tout à fait aussi satisfaisante que pour les gammes majeures. La dominante des tons mineurs est, en effet, la quinte d'un accord mineur, et le son fondamental d'un accord majeur ; mais, comme, d'après la règle, les accords mineurs doivent être mis sous la forme *la* — *ut* — *mi*, et les accords majeurs sous la forme *fa*♭ — *la*♭ — *ut*♭, la dominante considérée doit pouvoir être soulignée dans le premier accord, et non soulignée dans le second, c'est-à-dire qu'on doit faire faire un changement enharmonique, comme dans l'exemple donné, où le *mi* est identifié au *fa*♭. L'instrument nous donne donc, parfaitement justes, les tons mineurs :

1° *la* ou *si*♭♭ mineur : *ré* — *fa* — *la* — *ut* — *mi*
fa♭ — *la*♭ — *ut*♭ ;

2° *mi* ou *fa*♭ mineur : *la* — *ut* — *mi* — *sol* — *si*
ut♭ — *mi*♭ — *sol*♭ ;

3° *si* ou *ut*♭ mineur : *mi* — *sol* — *si* — *ré* — *fa*♯
sol♭ — *si* — *ré*♭ ;

4° *fa*♯ ou *sol*♭ mineur : *si* — *ré* — *fa*♯ — *la* — *ut*♯
ré — *fa* — *la*♭ ;

(1) Il est très-facile d'accorder l'instrument dès la première tentative. M. Schiedmayer y est arrivé de la manière suivante : partant du *la*, sur le clavier inférieur, il prenait les quintes *ré* — *la*, *sol* — *ré*, *ut* — *sol* exactement justes, ce qui donnait les sons *ut*, *sol*, *ré*. Ensuite les accords *ut* — *mi* — *sol*, *sol* — *si* — *ré*, *ré* — *fa*♯ — *la*, fournissaient les trois sons *mi*, *si*, *fa*♯ ; enfin la quinte *fa*♯ — *ut*♯ donnait l'*ut*♯. En posant maintenant *mi* = *fa*♭, *si* = *ut*♭, *fa*♯ = *sol*♭, *ut*♯ = *ré*♭, on forme avec des tierces de la gamme naturelle, jusqu'à ce qu'on n'entende plus de battements, les accords majeurs *fa*♭ — *la*♭ — *ut*♭, *ut*♭ — *mi*♭ — *sol*♭, *sol*♭ — *si*♭ — *ré*♭, et enfin la quinte *si*♭ — *fa*. Toutes les notes du clavier inférieur sont alors déterminées. Pour le clavier supérieur, on accorde d'abord le *mi*, quinte du *la* inférieur, et les trois accords majeurs *mi* — *sol*♯ — *si*, *si* — *ré*♯ — *fa*♯, *fa*♯ — *la*♯ — *ut*♯ et la quinte *la*♯ — *mi*♯. En posant *sol*♯ = *la*♭, *ré*♯ = *mi*♭, *la*♯ = *si*♭, *mi*♯ = *fa*, on fixe encore les tierces dans les accords majeurs : *la*♭ — *ut* — *mi*♭, *mi*♭ — *sol* — *si*♭, *si*♭ — *ré* — *fa*, et la quinte *ré* — *la*. Toutes les notes sont alors déterminées. Il est beaucoup plus facile d'accorder suivant ce système, que suivant celui du tempérament égal.

5° *ut*♯ ou *ré*♭ mineur : *fa*♯ — *la* — *ut*♯ — *mi* — *sol*♯
la♯ — *ut* — *mi*♭;

6° *sol*♯ ou *la*♭ mineur : *ut*♯ — *mi* — *sol*♯ — *si* — *ré*♯
mi♭ — *sol* — *si*♭;

7° *ré*♯ ou *mi*♭ mineur : *sol*♯ — *si* — *ré*♯ — *fa*♯ — *la*♯
si♭ — *ré* — *fa*;

8° *la*♯ ou *si*♭ mineur : *ré*♯ — *fa*♯ — *la*♯ — *ut*♯ — *mi*♯
fa — *la* — *ut*.

Les six derniers sons fondamentaux d'*ut*♭ à *si*♭ ont en même temps la gamme majeure. Nous trouvons donc des gammes mineures complètes sur tous les degrés de la gamme de *si* majeur et de *mi* majeur; des gammes complètes majeures et mineures sur tous les degrés de la gamme de *si* majeur, à l'exception du *mi*.

Dans des expériences préliminaires faites sur un autre harmonium, où j'avais à ma disposition les sons redoublés, seulement dans une octave, commune à deux registres, je m'attendais à ne pouvoir que très-peu distinguer si les autres gammes mineures présentaient une septième pythagoricienne un peu trop haute, ou même si les accords mineurs, déjà un peu troubles par eux-mêmes, étaient exécutés dans la gamme pythagoricienne. Quand on frappe des accords mineurs isolés, la différence n'est que peu appréciable. Mais, si on traverse une série un peu longue d'accords formés d'intervalles naturels et que l'oreille s'y habitue, on devient au contraire assez sensible à tout accord faux qui s'y trouve mêlé, pour en éprouver une sensation désagréable très-prononcée.

Ce qu'il y a encore de moins mauvais, c'est de prendre dans le système pythagoricien la septième ou sensible, parce que cette note, dans la musique moderne au moins, ne se présente guère que dans l'accord de septième de dominante, ou dans d'autres accords dissonnants.

Elle sonne cependant avec beaucoup de dureté dans un accord majeur juste. L'effet est moins désagréable dans une dissonnance, parce que la hauteur, un peu trop grande, ne fait qu'accuser davantage le rôle de sensible du ton. En revanche, j'ai trouvé aux accords mineurs, formés de tierces pythagoriciennes, un caractère intolérable bien marqué, lorsqu'on les mélange à des accords majeurs ou mineurs pris dans la gamme naturelle. En admettant, par conséquent, dans l'accord de septième de dominante, une septième trop élevée, on a encore les gammes mineures suivantes :

9° *ré* mineur : *sol* — *si*♭ — *ré* — *fa* — *la* — *ut*♯ — *mi*;

10° *sol* mineur : *ut* — *mi*♭ — *sol* — *si* — *ré* — *fa*♯ — *la*;

11° *ut* mineur : *fa* — *la*♭ — *ut* — *mi* — *sol* — *si* — *ré*;

12° *fa* mineur : *si♭* — *ré♭* — *fa* — *la♭* — *ut* — *mi* — *sol* ;
13° *si♭* mineur : *mi♭* — *sol♭* — *si♭* — *ré* — *fa* — *la* — *ut* ;
14° *mi♭* mineur : *la♭* — *ut♭* — *mi♭* — *sol♭* — *si♭* — *ré* — *fa*.

Dans la série précédente nous avions déjà *si♭* et *mi♭* mineurs. La suite des tons mineurs se termine donc, de manière que les deux extrémités se confondent par une modulation enharmonique.

Dans la majorité des cas, on peut transposer des phrases musicales, qu'on veut exécuter dans ce système, sans être forcé de recourir à la modulation enharmonique, lorsque l'étendue des modulations entre les divers tons n'est pas trop considérable. Si on ne peut éviter le changement enharmonique, il faut chercher à l'opérer aux endroits où les accords qui se suivent ne sont pas directement alliés. Ce qu'il y a de mieux, c'est de le faire entre des accords dissonnants. Naturellement, il faut en passer par la modulation enharmonique, au moins toutes les fois qu'une phrase parcourt toute la série des quintes, par exemple d'*ut* majeur à *si♯* majeur. Mais Hauptmann a bien raison de considérer une modulation de ce genre comme un artifice peu naturel, qui n'est possible qu'à cause de l'imperfection de notre système de tempérament. En tout cas, elle détruit, pour l'oreille, le sentiment de l'unité de la tonique ; car, bien que, par la hauteur, le *si♯* soit très-voisin de l'*ut*, et même que les deux notes soient tout à fait confondues par approximation, l'auditeur ne peut retrouver le sentiment de la tonique précédente, qu'en refaisant en sens inverse la modulation par laquelle il a passé. Le souvenir de la hauteur absolue de la première tonique *ut*, après de longues modulations, ne peut, au moment où on arrive au *si♯*, être encore assez précis pour qu'on reconnaisse l'identité des deux notes. Pour un sentiment artistique délicat, le *si♯* doit toujours être une tonique très-éloignée de l'*ut*, obtenue par une longue série de modulations à la dominante; ou bien, ce qui est plus probable, une modulation aussi éloignée amène une confusion complète dans le sentiment de la tonalité, et, par suite, le ton dans lequel se termine le morceau, devient tout à fait indifférent. En général, l'usage exagéré de modulations hardies est, pour les compositeurs modernes, un moyen rationnel et d'un facile emploi, pour donner à leurs phrases du piquant et de la couleur. Mais on ne peut vivre de piment, et, presque toujours, une modulation forcée a pour effet de détruire le lien artistique de la phrase. Il ne faut pas oublier que les modulations ne sont qu'un moyen d'accuser davantage, par le contraste, la persistance de la tonique, le retour à cette note, ou d'arriver à un effet isolé d'une expression particulière.

Comme les instruments à deux claviers ont, ordinairement, pour

chacun, deux séries particulières d'anches, dont une seule de chaque clavier était employée pour le système précédemment décrit, j'ai fait accorder les deux autres (un registre de 8 pieds et un de 16) à la manière ordinaire, suivant le tempérament égal; on pouvait ainsi très-facilement comparer les effets de la gamme tempérée avec ceux de la gamme naturelle; on n'avait qu'à tirer des registres, pour entendre le même accord dans l'un ou l'autre système (1).

En ce qui concerne l'effet musical de la gamme naturelle, elle diffère du tempérament égal et du système grec par quintes naturelles, d'une manière très-appréciable. Les accords, notamment les accords majeurs dans leur meilleur renversement, présentent, malgré le timbre assez mordant particulier aux instruments à anche, une harmonie très-pleine, et, pour ainsi dire, surabondante; ils s'écoulent en courants réguliers, sans donner de tremblements ni de battements. A côté d'eux, les accords tempérés ou pythagoriciens paraissent durs, troublés, tremblotants, irréguliers. La différence est assez grande pour que toute personne, musicienne ou non, la constate immédiatement. Dans la gamme naturelle, les accords de septième ont à peu près le même degré de dureté qu'un accord ordinaire, tempéré, pris à la même hauteur. C'est dans les octaves aiguës que la différence entre les accords naturels et tempérés, s'accuse le plus nettement, de la manière la plus désagréable, parce que, là, les sons résultants faux du tempérament se font le mieux entendre, le nombre des battements pour une même différence de hauteur est plus grand, et la dureté beaucoup plus sensible que dans les régions graves.

Un autre point essentiel, d'une grande importance est que, la différence entre les accords majeurs et les mineurs, entre les divers renversements, entre les consonnances et les dissonnances, est beaucoup plus tranchée, beaucoup plus nette que dans la gamme tempérée. Aussi les modulations ont-elles beaucoup plus d'expression qu'à l'ordinaire. On peut apprécier beaucoup de nuances délicates qui, autrement, s'évanouissent d'une manière à peu près complète, notamment celles fournies par les renversements; d'un autre côté, les dissonnances deviennent beaucoup plus mordantes, par le contraste avec les accords naturels. L'accord de septième diminuée, par exemple, si employé dans la musique actuelle, atteint presque, dans la gamme naturelle, aux limites extrêmes de ce qu'on peut tolérer.

Les particularités de la gamme naturelle se manifestent surtout dans l'ancienne musique italienne de Palestrina, Vittoria, Gabrieli et

(1) On a indiqué, dans le supplément n° xv, des dispositions qui complètent la série des tons dans ce système, et facilitent singulièrement le jeu, en n'exigeant l'emploi que d'un seul clavier.

leurs contemporains. Ces œuvres réclament les consonnances les plus justes, parce qu'elles n'obtiennent les nuances les plus délicates de l'harmonie que par les renversements des accords, l'alternance des accords majeurs et mineurs, et un petit nombre de dissonnances formées par des retards. Exécutées dans la gamme tempérée, elles perdent tout sens et toute expression, tandis que, grâce à l'emploi de la gamme naturelle, elles produisent souvent sur l'harmonium un bon effet.

Les musiciens modernes, qui, à de rares exceptions près, n'ont jamais entendu d'autre gamme que la gamme tempérée, passent en général très-facilement sur les imperfections de ce système. L'altération qu'y subissent les quintes est très-peu de chose, cela est vrai, et, quant aux tierces, on dit ordinairement qu'elles forment une consonnance moins parfaite que celle de la quinte, et que, par suite, on est moins sensible à la fausseté de l'intervalle qu'on ne le serait pour les quintes. Cette dernière assertion est encore vraie, tant qu'on se renferme dans la musique à une seule partie, où les tierces figurent comme intervalles purement mélodiques, et non harmoniques. Dans un accord consonnant, au contraire, les altérations de la justesse sont également sensibles pour un son quelconque, la théorie et l'expérience s'accordent à le prouver, et l'effet désagréable de l'accord tempéré tient essentiellement à la tierce fausse.

On ne peut nier à cet égard que le tempérament, par sa simplicité, ne présente des avantages tout à fait exceptionnels pour la musique instrumentale ; tout autre système aurait infailliblement demandé, pour l'instrument, un mécanisme infiniment plus compliqué, et considérablement augmenté les difficultés de l'exécution. Aussi le grand développement de la musique instrumentale moderne n'était-il possible que sous l'empire du système tempéré. Mais il ne faut pas croire que la différence entre la gamme tempérée et la gamme naturelle soit une subtilité mathématique sans aucune valeur pratique. Elle est assez frappante même pour les oreilles peu musiciennes ; c'est ce que prouve en un clin d'œil l'observation faite sur un instrument juste. Au reste, les anciens musiciens encore habitués aux intervalles naturels du chant, si soigneusement cultivé de leur temps, éprouvaient les mêmes sensations, comme on le voit en jetant un coup d'œil sur les ouvrages de musique écrits pendant la seconde moitié du dix-septième siècle et la première moitié du dix-huitième, époque à laquelle on discutait les divers systèmes de tempérament proposés, où l'on imaginait méthodes sur méthodes, sans cesse rejetées, pour vaincre la difficulté, et où l'on fixait la forme des instruments, de manière à leur permettre d'exécuter d'une manière pratique les diffé-

rences enharmoniques des intervalles. Prætorius (1) fait mention d'un *clavicymbale universel*, qu'il vit à Prague chez l'organiste de cour de l'empereur Rodolphe II ; cet instrument avait soixante-dix-sept touches dans une étendue de quatre octaves, soit dix-neuf sons à l'octave ; le nombre des touches noires n'était pas seulement doublé, on avait encore intercalé des sons entre le *mi* et le *fa*, aussi bien qu'entre le *si* et l'*ut*. Dans les anciens systèmes proposés, on accordait ordinairement par quintes un peu trop faibles, un certain nombre de sons entre lesquels on en intercalait d'autres formant la tierce naturelle. Les intervalles sur lesquels se concentraient les fautes, s'appelaient *les loups*. Prætorius dit : « Ce qu'il y a de mieux, c'est que le loup et son hurlement sauvage restent dans la forêt, et ne viennent pas troubler nos *harmonicas concordantias*. » Rameau lui-même, qui, depuis, a le plus contribué à faire prévaloir l'usage du tempérament égal, Rameau, en 1726 (2), proposait encore un autre système dans lequel les tierces des tons usuels étaient conservées justes au prix des quintes et des tons moins employés. On procédait par quintes à partir d'*ut*, mais en faisant l'intervalle trop petit, de manière que la quatrième quinte en montant fût non le *mi*, mais la tierce naturelle de l'*ut*, c'est-à-dire le *mi* = *fa*♭. De même, la quatrième quinte en descendant serait non le *la*♭, mais le *la*♭, tierce naturelle du *fa*♭. Mais il fallait nécessairement faire trop grandes les quatre quintes qui séparent ce *la*♭ de l'*ut*, parce que c'est le *la*♭ et non le *la*♭ qui est à quatre quintes naturelles de l'*ut*. Ce système donne justes les tierces *ut* — *mi* — *sol*, *si* — *ré* — *fa*♯, *mi* — *sol*♯ ; mais, si l'on va plus loin que le *mi* du côté de la sus-dominante, et que l'*ut* du côté de la sous-dominante, on trouve des tierces toujours de plus en plus mauvaises ; la faute commise sur les quintes est environ trois fois aussi grande que dans le tempérament égal. En 1762, d'Alembert pouvait encore signaler ce système comme usité en France, par opposition au tempérament égal, que Rameau avait proposé depuis. On trouve une longue série d'autres systèmes énumérés dans Marpurg (3). Une fois qu'on se vit forcé par l'emploi d'instruments ne présentant que douze sons à l'octave, de subir une série d'intervalles faux et de s'y accoutumer, il valait certainement mieux se décider à altérer le peu de tierces naturelles qu'on avait encore dans la gamme, et à fausser tous les intervalles de la même quantité. Il est naturellement beaucoup plus désagréable d'entendre à côté d'intervalles justes des intervalles

(1) *Syntagma musicum*, II, cap. XI, p. 63.
(2) *Nouveau Système de musique*, chap. XXIV.
(3) *Essai sur le tempérament musical*. Breslau, 1776.

très-faux, que des intervalles ayant tous une fausseté moyenne, entièrement débarrassés du contraste avec des intervalles justes. L'avantage du tempérament égal sur les autres, dits inégaux, ne peut donc être douteux tant qu'il faut limiter à douze le nombre des sons à l'octave, et c'est aussi ce système qui devait définitivement prévaloir à l'exclusion de tous les autres. Seuls, les instruments à archet, avec leurs quatre quintes naturelles *ut*—*sol*—*ré*—*la*—*mi*, s'en écartent encore.

En Allemagne on commença, plus tôt qu'en France, à faire usage du tempérament égal. Dans le second volume de sa *Critica musica* paru en 1725, Matheson nomme Neidhart et Werckmeister, comme les inventeurs de ce tempérament (1). Sébastien Bach l'a déjà appliqué au clavecin ; on doit le supposer d'après un passage de Kirnberger, cité dans Marpurg, où il dit que, comme élève du vieux Bach, il avait dû accorder son clavecin et faire toutes les tierces un peu trop hautes. Emmanuel Bach, fils de Sébastien, célèbre comme claveciniste, auteur d'un ouvrage paru en 1753, et important pour l'époque, sur « la vraie manière de jouer du clavecin, » demande pour cet instrument l'application exacte du tempérament égal.

Les anciennes tentatives d'introduire plus de douze sons dans la gamme, n'ont rien donné qui pût être admis dans la pratique, parce qu'elles ne reposaient sur aucun principe exact. Elles se ramenaient toujours au système grec de Pythagore, et supposaient qu'il suffisait de faire une différence entre l'*ut*♯ et le *ré*♭, le *fa*♯ et le *sol*♭, etc.. Or, cela ne suffit pas du tout, et cela n'est pas toujours exact. D'après notre notation, on peut identifier l'$\underline{ut}$♯ avec le *ré*♭, mais nous devons distinguer l'*ut*♯ obtenu par quintes, de l'$\underline{ut}$♯ fourni par le rapport de tierce. Aussi, les essais d'instruments à touches composées n'ont-ils donné jusqu'ici aucun résultat qui ait répondu à la complication du mécanisme et aux difficultés apportées dans l'exécution. Le seul instrument de ce genre, encore usité aujourd'hui, est la *harpe-pédale à double mouvement*, sur laquelle on peut changer la hauteur d'une note par la pression du pied.

Indépendamment de l'habitude et de l'absence de comparaison avec les intervalles naturels, diverses autres circonstances viennent faciliter encore l'emploi du tempérament égal.

Il faut remarquer d'abord que les altérations de la gamme par le tempérament tiennent aux battements, et sont d'autant moins sensi-

(1) P. 162 de l'ouvrage cité. Je trouve dans Forkel la liste suivante des écrits de ces deux auteurs : Neidhart, chef d'orchestre de la musique royale de Prusse, *Le meilleur et le plus simple tempérament du monocorde*. Iéna, 1706. *Sectio canonis harmonici*. Kœnigsberg, 1724. Werckmeister, organiste à Quedlinbourg, en 1645. *Tempérament musical*. Francfort et Leipzig, 1691.

bles que le mouvement est plus rapide, et que la durée de chaque note est isolément plus faible. Quand la note est assez brève pour que quelques battements en petit nombre puissent seuls se produire pendant sa durée, l'oreille n'a pas le temps de remarquer leur présence. Les battements qui prennent naissance dans le tempérament sont les suivants :

1° Battements de la quinte tempérée. Supposons que le la_2 fasse 440 vibrations par seconde ; l'ut_2 en fera 264 ; la quinte tempérée $ut_2 — sol_2$ donne alors par seconde $1 + \frac{1}{9}$ battements dus soit aux harmoniques, soit aux sons résultants. Ces battements sont nettement perceptibles dans tous les cas.

2° Battements des deux premiers sons résultants de $ut_2 — mi_2$ et de $mi_2 — sol_2$; $5\frac{2}{3}$ battements par seconde dans la gamme tempérée. Encore nettement perceptibles dans tous les timbres quand l'intensité du son n'est pas trop faible.

3° Battements de la tierce majeure seule $ut_2 — mi_2$; $10\frac{1}{2}$ à la seconde, mais ne sont nettement perceptibles que dans les timbres mordants, formés d'harmoniques intenses.

4° Battements de la tierce mineure $mi_2 — sol_2$; 17 à la seconde ; mais ils seront en général beaucoup plus faibles que ceux de la tierce majeure ; ne s'entendent bien que dans les timbres mordants.

On doublera le nombre de ces battements en montant d'une octave ; on le diminuera de moitié en descendant de la même quantité.

Les premiers, les battements de la quinte tempérée, sont ceux qui exercent l'influence la moins préjudiciable sur l'harmonie de l'accord. Ils sont assez lents pour que, dans les régions moyennes, on puisse les entendre seulement dans les notes longtemps prolongées ; ils donnent alors naissance à la lente fluctuation de l'accord, qui peut très-bien se produire dans certaines circonstances. C'est dans les timbres doux que ressortent le mieux les battements de la seconde espèce. Dans l'*allegro*, il y a environ deux temps ou quatre noires pour trois secondes. Si dans ce mouvement, l'accord tempéré $ut_2 — mi_2 — sol_2$ est écrit en noires, on peut entendre $2\frac{1}{8}$ battements, et, par conséquent, si le son est faible en commençant, il enflera, puis diminuera deux fois avant de s'éteindre. L'effet désagréable sera à peine sensible dans un mouvement rapide, agité. Il sera plus appréciable, cependant, si on élève l'accord d'une ou deux octaves ; pour une même durée de la note, il se produit alors $4\frac{1}{4}$ ou $8\frac{1}{2}$ battements, que l'oreille a déjà le temps d'apprécier sous la forme de mordant, d'aigreur dans le son.

Pour la même raison, les battements de troisième et de quatrième

espèce, ceux des tierces, dans les timbres mordants où ils ont de la netteté, agissent d'une manière assez sensible, même dans les régions moyennes et dans les mouvements rapides; ils troublent très-notablement la pureté de l'harmonie, parce qu'ils sont en nombre deux et trois fois plus grand que les précédents. Dans les timbres doux, ils ne sont que peu appréciables, ou, s'ils le sont, ils restent couverts par des sons purs beaucoup plus forts, en sorte qu'ils ne sont que peu sensibles.

Par conséquent, dans les notes rapides, dans les timbres doux, dans les sons d'intensité moyenne, les vices du tempérament ne s'accusent que d'une manière peu sensible. Or, aujourd'hui, presque toute la musique instrumentale présente des mouvements rapides; c'est dans cette rapidité qui lui est propre que réside sa valeur essentielle, par opposition à la musique vocale. On pourrait se demander cependant si la musique instrumentale, entraînée dans la voie des mouvements rapides, n'a pas penché trop exclusivement d'un seul côté, par cela même que, dans le système tempéré, elle ne peut donner aux accords prolongés une harmonie aussi pleine que des chanteurs bien exercés, et que, par suite, elle a dû renoncer à cette portion du domaine musical.

Le tempérament a pris naissance et s'est développé avec avantage, d'abord sur le clavecin d'où il a passé peu à peu sur les autres instruments. En réalité, sur le clavecin, les circonstances sont particulièrement favorables pour dissimuler les défauts du système. Les sons ont, en effet, au premier moment, immédiatement après l'attaque, une grande intensité qui diminue rapidement. J'ai déjà dit plus haut, que, pour cette raison, les sons résultants ne se produisent qu'au premier moment, et sont très-difficiles à entendre. Par conséquent, les battements qui dépendent des sons résultants, disparaissent d'une manière absolue. Quant aux battements qui dépendent des harmoniques, on les a atténués sur les nouveaux pianos, précisément dans les régions élevées où ils sont le plus nuisibles, en affaiblissant beaucoup les harmoniques des cordes par le mode d'attaque, et en adoucissant beaucoup le timbre, comme je l'ai expliqué dans le cinquième chapitre. Par suite, sur le piano, les défauts du système sont beaucoup moins accusés que sur n'importe quel autre instrument à sons fixes; ils ne disparaissent pas cependant d'une manière complète. Quand je passe de mon harmonium accordé suivant la gamme naturelle à un piano à queue, tout y sonne faux et sans pureté, notamment si j'exécute des suites d'accords plaqués. Dans les dessins mélodiques rapides et dans les arpéges, c'est moins désagréable. Aussi, les anciens musiciens ne recommandaient-ils, en général, que pour le clavecin l'usage du

tempérament égal. Matheson reconnaît, pour l'orgue, les avantages du tempérament inégal de Silbermann, où les tonalités usuelles sont maintenues dans la gamme naturelle. Emmanuel Bach dit qu'un clavecin bien accordé est *le plus juste de tous les instruments*, ce qui est tout à fait exact dans le sens indiqué plus haut. Par sa grande diffusion et la commodité qu'il présente, le piano est devenu plus tard le principal instrument pour l'étude de la musique, et sa gamme a servi de modèle aux autres instruments.

En revanche, dans les registres mordants de l'orgue, notamment dans les jeux de fournitures et des tuyaux à anche, les défauts du tempérament sont extraordinairement accusés. On tient aujourd'hui pour inévitable que, les jeux de fournitures donnent un affreux gâchis lorsqu'on y joue toutes les parties, et les organistes se sont résignés à leur sort. Mais cet effet si désagréable n'est dû qu'au tempérament égal ; il faut, en effet, prendre nécessairement dans la gamme naturelle les quintes et les tierces entre les tuyaux qui appartiennent à la même touche ; autrement chaque note du registre donne déjà des battements. Si maintenant on prend dans la gamme tempérée les quintes et les tierces appartenant à diverses touches, dans chaque accord se trouvent simultanément mêlées des quintes et des tierces naturelles et tempérées, ce qui donne naissance à un tout impur et grinçant. Et c'est précisément pour l'orgue qu'il serait si facile, au moyen d'un petit nombre de registres appropriés à chaque ton, d'obtenir des consonnances parfaites dans toute leur plénitude (1).

Quiconque a entendu une seule fois la différence entre les accords naturels et les accords tempérés, ne peut douter que la plus grande amélioration à apporter aux grandes orgues, consisterait à supprimer la moitié des registres dont la variété n'est assez souvent qu'un enfantillage, et de doubler le nombre des sons à l'octave, de manière à pouvoir, au moyen de registres, jouer juste dans tous les tons.

Il en est de même pour l'harmonium. C'est dans les sons résultants faux du tempérament et le tremblotement des accords, qu'il faut certainement chercher la cause de l'opinion de beaucoup de musiciens sur cet instrument, qu'ils accusent d'être faux et de porter sur les nerfs.

Les instruments d'orchestre peuvent en général modifier un peu la hauteur. Les instruments à archet sont tout à fait libres dans leur intonation, et, en soufflant plus ou moins fort dans les instruments à vent, on peut faire hausser ou baisser un peu le son. Ils sont tous, il

(1) Je vois, dans le livre de Zamminer, que le *Journal scientifique* de Sillimann donne, en 1850, la description d'un orgue de Poole sur lequel on pourrait, au moyen de registres, jouer juste dans tous les tons.

est vrai, accordés suivant le tempérament, mais un habile exécutant a le moyen de satisfaire, dans une certaine mesure, les exigences de l'oreille. C'est ainsi que des passages en tierces sur les instruments à vent, exécutés par des musiciens médiocres, sont assez souvent d'une justesse douteuse, tandis que, joués par d'habiles artistes ayant l'oreille délicate, ils sonnent parfaitement bien.

Il se présente quelque chose de particulier sur les instruments à archet. Ils ont encore conservé, depuis l'antiquité, pour leurs cordes, le système pythagoricien par quintes naturelles. Le violon, à lui seul, a les quintes naturelles *sol* — *ré* — *la* — *mi*. L'alto et le violoncelle y joignent encore la quinte *ut* — *sol*. Chacune de leurs gammes a un doigté spécial, et, par suite, tout exécutant pourrait bien s'exercer à donner à chaque ton sa gamme particulière ; il faudrait, dans tous les cas, éviter d'employer également les sons de même nom, et ne pas prendre sur le violon comme tierce de la gamme d'*ut* majeur, le *mi* à vide, lorsque l'alto donne comme son fondamental l'*ut* à vide, car la tierce de cette note est $\underline{mi}$ et non *mi*. Depuis Spohr, cependant, les modernes écoles de violon tendent, en général, à adopter les intervalles de la gamme tempérée, quoique ce soit à peu près impossible, grâce aux quintes naturelles des cordes à vide. En tout cas, la préoccupation avouée de la plupart des violonistes actuels est de ne distinguer que douze intervalles à l'octave. Ils ne font qu'une seule exception en ce sens que, dans les doubles cordes, ils prennent souvent le son à une hauteur un peu différente de celle qu'ils donneraient aux notes isolées. Mais cette exception est décisive. Dans les passages en doubles cordes, l'artiste se sent responsable de l'harmonie de l'intervalle, et il a pleinement à sa disposition les moyens de rendre la consonnance bonne ou mauvaise ; alors il aime mieux jouer juste. Tout violoniste pourra facilement se rendre compte des faits suivants. Après avoir accordé les cordes d'un violon par quintes naturelles *sol* — *ré* — *la* — *mi*, qu'il cherche sur la corde *la* le point où il faut placer le doigt pour avoir le *si* qui fait avec le *mi* la quarte naturelle *si* — *mi*. Puis, sans changer le doigt de place, qu'il attaque en même temps ce *si* et la corde *ré*. L'intervalle *ré* — *si*, d'après la manière usuelle de le considérer, serait une sixte majeure, mais une sixte pythagoricienne. Pour avoir la sixte consonnante *ré* — $\overline{si}$, l'artiste doit ramener en arrière son doigt de $1 + \frac{3}{5}$ ligne de Paris, distance très-facilement appréciable dans le doigté, et qui change très-notablement la hauteur du son, aussi bien que la beauté de la consonnance.

Mais il est évident que, si l'exécutant isolé se sent forcé de distinguer les différentes valeurs des notes dans les différentes gammes, il n'y a

absolument aucune raison de vouloir conserver dans le quatuor les mauvaises tierces de la série des quintes. Il arrive souvent que des accords à plusieurs parties, exécutés en quatuor par plusieurs artistes, sonnent très-mal, quoique chacun des exécutants soit à même de jouer individuellement sa partie très-bien et d'une manière très-agréable. On ne peut cependant admettre comme règle que, dans les quatuors exécutés par des artistes très-habiles, il existe des consonnances fausses. A mon avis, la seule explication possible est que l'exécutant exercé, doué d'un sentiment musical délicat, sait donner sur son violon les sons qu'il veut entendre, sans se laisser enchaîner par les règles d'une école imparfaite. Les virtuoses de premier ordre jouent en réalité suivant les intervalles naturels ; c'est ce qui résulte directement des recherches très-intéressantes et très-précises de Delezenne (1). Il répétait, sur une corde sonore, exactement divisée, chaque note de la gamme majeure, telle que l'exécutaient des violonistes ou violoncellistes distingués ; il a trouvé ainsi que ces artistes faisaient précisément les tierces et les sixtes dans la gamme naturelle et non dans la gamme tempérée ou pythagoricienne. Mais, quoique des virtuoses connaissant bien les morceaux qu'ils vont jouer, soient en état de surmonter les défauts de leur école et du système tempéré, ce serait aider singulièrement les talents de second ordre à arriver à la perfection dans l'ensemble, que de les habituer dès le début à jouer les gammes suivant les intervalles naturels ; la difficulté plus grande des commencements serait amplement compensée par les résultats ultérieurs. Il est d'ailleurs beaucoup plus facile qu'on ne le croit généralement, d'apprécier la différence entre les notes de même nom, dès qu'on s'est une fois habitué au son des consonnances naturelles. J'apprécie le changement du *la* en $\underline{la}$ dans un accord consonnant, sur mon harmonium, aussi vite et aussi sûrement que celui du *la* en *la*♭ sur le piano (2).

Je connais cependant trop peu le mécanisme du violon, pour me hasarder ici à proposer un règlement définitif du système des sons sur les instruments à archet. Cette tâche doit être réservée aux maîtres qui réunissent les capacités de l'exécutant à celles du compositeur. Ils pourront facilement s'assurer, par le témoignage de leur oreille, de

(1) *Recueil des travaux de la Société des sciences, de l'agriculture et des arts de Lille*, 1826, et premier semestre 1827. *Mémoire sur les valeurs numériques des notes de la gamme*, par M. Delezenne. Voir dans le supplément XVI des observations analogues pour le chant.

(2) J'ai eu moi-même occasion de vérifier l'exactitude des observations de Delezenne ; M. Joachim, le célèbre artiste, a eu la bonté de jouer la gamme sur son violon, à côté de mon harmonium. Il faisait les tierces et les sixtes parfaitement justes.

l'exactitude des faits qui précèdent, et se convaincre qu'il ne s'agit pas ici de spéculations mathématiques sans utilité, mais de questions pratiques d'une très-grande importance.

Il en est de même des chanteurs d'aujourd'hui. Dans le chant, l'intonation est parfaitement libre, tandis que, sur les instruments à archet, les sons des cinq cordes à vide conservent une hauteur invariable. C'est dans le chant, que la hauteur du son peut le plus facilement et le plus complétement obéir aux impulsions d'une oreille musicale délicate : aussi toute musique vient-elle du chant qui devra toujours rester la véritable et naturelle école. Le chanteur ne peut exécuter avec justesse et sûreté que les intervalles que l'oreille apprécie avec sûreté et justesse ; par suite ce que la voix émet facilement et naturellement, l'oreille le trouvera aussi naturel et facile à comprendre.

Jusqu'au dix-septième siècle, les chanteurs étaient enseignés au moyen du monochorde pour lequel Zarlino, au milieu du seizième siècle, avait retrouvé la vraie gamme naturelle. L'éducation des chanteurs, à cette époque, se faisait avec un soin dont nous ne pouvons actuellement avoir aucune idée. Aussi peut-on encore voir, par la musique sacrée de l'École italienne du quinzième et du seizième siècle, qu'elle est combinée pour la plus pure harmonie des consonnances, et qu'elle perd tout son effet, dès qu'elle est exécutée sans une justesse suffisante.

On ne peut nier qu'actuellement, même parmi nos chanteurs d'opéra, un petit nombre seulement soient capables de chanter une petite phrase à plusieurs parties sans accompagnement, ou accompagnée de quelques rares accords, comme, par exemple, le trio des masques de *don Juan*, de manière à donner à l'auditeur ce bien-être complet qui résulte d'une parfaite harmonie. Les accords sonnent presque toujours d'une manière un peu aigre et sans sûreté, de manière à indisposer une oreille musicale. Au reste, où nos chanteurs apprendraient-ils à chanter juste, et à rendre leur oreille sensible à l'harmonie des accords justes ? Ils sont exercés dès le début à chanter avec accompagnement d'un piano accordé suivant le tempérament égal. S'ils sont accompagnés par un accord majeur, ils peuvent se mettre d'accord avec la basse fondamentale, la tierce ou la quinte. Il leur reste une latitude de presque un cinquième de demi-ton, dans laquelle la voix peut errer sans altérer précisément l'harmonie, et même, en allant un peu plus haut que ne l'exige la consonnance avec la tierce aiguë, un peu plus bas que ne le veut la quinte, l'harmonie de l'accord ne devient pas beaucoup plus mauvaise. Le chanteur, qui s'exerce à l'aide d'un instrument tempéré, n'a donc absolument aucun

principe qui lui permette de déterminer, sûrement et avec précision, la hauteur à laquelle il faut conduire sa voix.

D'un autre côté, on voit souvent quatre amateurs, habitués à beaucoup chanter ensemble, exécuter des quatuors avec une justesse parfaite. D'après ma propre expérience, je pourrais même dire qu'il est plus fréquent d'entendre chanter parfaitement juste un quatuor, par des jeunes gens, qui ne chantent guère autre chose que des airs à quatre voix, mais qui s'exercent régulièrement, que par des solistes exercés, mais habitués à l'accompagnement du piano. Or, la justesse du chant est tellement la première et la plus importante condition de sa beauté, qu'une voix juste, même faible et peu agile, est toujours agréable, tandis que la voix la plus belle, la plus exercée fait souffrir l'oreille, quand elle détonne ou va trop haut. Il en est ici exactement de même que pour les instruments à archet. L'enseignement des chanteurs actuels, à l'aide d'instruments tempérés, est mauvais, mais de bonnes organisations musicales peuvent, par le travail même, finir par revenir dans la bonne voie, et se débarrasser des vices de l'école. Cela leur arrive peut-être même d'autant plus qu'elles ont moins fréquenté l'école, bien que je ne veuille naturellement pas nier que l'étude seule peut donner l'agilité à la voix, et la débarrasser des imperfections de toute nature.

Mais il n'est évidemment pas nécessaire d'accorder suivant le tempérament, les instruments avec lesquels s'exerce le chanteur. Il suffit pour ces exercices, d'une seule tonalité qui soit juste. On n'a pas besoin de jouer des sonates sur un piano qui sert à l'exercice du chant. Il vaudrait mieux cependant que le chanteur pût se faire accompagner d'un orgue ou d'un harmonium justes, sur lesquels, au moyen de deux claviers, on peut utiliser tous les tons. Il faut notamment préférer les sons tenus dans l'accompagnement, parce que le chanteur entend aussitôt des battements se produire, pour peu qu'il change un peu la véritable hauteur. Qu'on attire son attention sur ces battements, et il aura là un moyen aussi précis que possible de contrôler sa propre intonation. C'est très-facile avec l'harmonium que je me suis fait construire pour mes expériences. Si le chanteur, à chaque déviation même très-légère de la vraie hauteur, en est averti par un phénomène saisissant, il lui deviendra possible de disposer des mouvements de son gosier, de la tension de ses cordes vocales avec assez de délicatesse pour pouvoir émettre avec une parfaite sûreté, le son réclamé par son oreille. Quand on demande un travail difficile aux muscles du corps, ici à ceux du larynx, il faut avoir un moyen sûr d'apprécier si le but poursuivi est atteint. C'est ce moyen que les battements fournissent à la voix quand elle est accompagnée d'accords

justes prolongés. Les accords tempérés, qui donnent eux-mêmes des battements, ne peuvent aucunement servir à cet usage.

Enfin, à mon avis, on ne peut méconnaître l'influence exercée par le tempérament sur le système de composition musicale. Cette influence a d'abord été favorable ; grâce à elle, les compositeurs et les exécutants ont pu se mouvoir avec la plus grande facilité dans les différents tons, les modulations ont pu prendre une richesse qui n'existait pas auparavant. Mais, d'autre part, on ne peut nier que cette richesse ne fût en quelque sorte imposée par le changement de système. En effet, comme l'harmonie des accords consonnants n'avait plus toute sa pureté, comme les différences entre les divers renversements s'évanouissaient, il fallait bien, par des moyens plus énergiques, par l'emploi plus fréquent de dissonnances mordantes et de modulations inusitées, chercher à remplacer ce que les harmonies particulières au ton lui-même avaient perdu en expression caractéristique. Aussi, dans beaucoup de compositeurs modernes, les accords dissonnants de septième sont-ils déjà en majorité, et les accords consonnants forment-ils l'exception, tandis qu'il ne peut être douteux pour personne que c'est l'inverse qui devrait avoir lieu, et que l'emploi prolongé de modulations hardies et heurtées doit tendre à faire entièrement disparaître le sentiment de la tonalité. Ce sont là de fâcheux symptômes pour le développement ultérieur de l'art. Le mécanisme de l'instrument, la considération des facilités d'exécution tendent à prévaloir sur les exigences naturelles de l'oreille, et à détrôner entièrement le principe fondamental de l'art moderne, c'est-à-dire la prépondérance incontestée de la tonique et de son accord. Nos derniers grands compositeurs, Mozart et Beethoven, sont encore au début de la période où commence la domination du tempérament égal. Mozart a encore eu occasion de faire de riches études dans les morceaux de chant. C'est le maître des maîtres pour la suavité de l'harmonie, lorsqu'il y vise, mais c'est presque le dernier. Beethoven a pris hardiment possession des richesses que pouvait lui offrir le développement de la musique instrumentale ; son vigoureux génie a trouvé là un instrument tout assoupli, tout préparé, dans lequel il a su faire naître une puissance de mouvement inconnue jusqu'à lui. Mais il a traité la voix humaine comme une humble servante, et elle n'a plus voulu lui dispenser les sublimes enchantements de son harmonie propre. Peut-on prendre d'ailleurs pour guide du développement ultérieur de l'art, une nature si supérieure, si mélancolique, issue d'une époque si profondément troublée ?

Et, dans tout cela, je ne vois pas qu'il soit si nécessaire de sacrifier la justesse de la voix aux commodités de la musique instrumentale.

Dès que les violonistes se décideront à jouer leurs gammes suivant les intervalles naturels, difficulté à peine appréciable pour eux, tous les autres instruments d'orchestre pourront se modifier de manière à s'adapter à la gamme plus juste des violons. Au reste, les cors et les trompettes ont déjà la gamme naturelle.

Il faut d'ailleurs remarquer ici que, si l'on prend le système naturel pour base des modulations, certaines d'entre elles relativement simples doivent s'opérer par des changements enharmoniques, ce qui n'aurait pas lieu dans le système tempéré. Il me paraît nécessaire que la nouvelle tonique à laquelle on veut arriver soit alliée à la tonique primitive ; plus l'affinité sera grande, et moins le passage sera forcé. En outre, il ne sera pas avantageux de rester longtemps dans un ton dont la tonique ne sera pas une alliée voisine de la tonique principale de la phrase. Les règles ordinairement données pour la modulation sont toutes d'accord sur ce point. Les changements de ton les plus faciles et les plus usités se font, comme on sait, à la dominante ou à la sous-dominante, qui, par le fait, sont les notes les plus étroitement alliées à la première tonique. Si donc *ut* est la tonique primitive, on peut immédiatement passer en *sol* majeur, où le *fa* et le *la* de la gamme d'*ut* deviennent le *fa*♯ et le *la*. On peut aussi passer en *fa* majeur en changeant le *si* et le *ré* en *si*♭ et en *ré*. Cela fait, on pourra souvent passer dans un ton relié à l'*ut* seulement par une affinité du second ordre, par conséquent du *sol* au *ré*, ou du *fa* au *si*♭. Si l'on voulait continuer à moduler de cette manière, on arriverait aux tons de *la* et de *mi*♭, dont le lien avec la tonique primitive *ut* n'est plus que très-peu sensible, et dans lesquels, en tout cas, il ne serait pas avantageux de séjourner, si l'on ne veut affaiblir très-notablement le sentiment de la tonalité principale.

D'autre part, on peut, à partir de la tonique principale *ut*, procéder par tierces ou par sixtes, et passer en *mi*, en *la*, ou en *mi*♭ et en *la*♭. Dans le système tempéré, ces modulations s'identifient avec le passage en *la* et en *mi*, par l'intermédiaire du *sol* et du *ré*, ou en *mi*♭ et en *la*♭ par l'intermédiaire du *fa* et du *si*♭. Mais ils se distinguent entre eux en réalité, comme le *la* et le *la*, le *mi* et le *mi*, etc. Dans le système tempéré, il semble permis de passer de l'*ut* par une sixte au ton de *la*, puis de revenir, par quintes, vers le *ré*, le *sol* et enfin l'*ut*. Mais, par le fait, on revient à un *ut* différent de celui dont on est parti. Pour une marche de ce genre, qui n'est pas tout à fait rationnelle, on devrait, dans le système naturel, admettre un changement enharmonique ; ce qu'il y aurait de mieux, ce serait de le faire pendant qu'on

serait en $\underline{\textit{ré}}$, parce que le $\underline{\textit{ré}}$ et le *ré* ont tous deux avec l'*ut* une affinité du second ordre. Dans les modulations compliquées des compositeurs modernes, il faudrait souvent faire des changements enharmoniques de ce genre. Un goût exercé devra déterminer où il faut les placer dans chaque cas particulier; je crois cependant qu'il est en général préférable d'observer la règle déjà énoncée, c'est-à-dire de choisir la hauteur des nouvelles toniques auxquelles on arrive par modulation, de manière à maintenir aussi étroite que possible leur affinité avec la tonique primitive. Les changements enharmoniques seront aussi peu remarqués que possible, si on les fait suivre ou précéder d'accords dissonnants bien caractérisés, par exemple des accords de septième diminuée. Au reste, les violonistes aujourd'hui font quelquefois, nettement et à dessein, des changements enharmoniques de ce genre, qui, bien placés, sont même d'un très-bon effet (1).

(1) Exemples dans Naumann, *Bestimmungen der Tonverhältnisse*. Leipzig, 1858, p. 48 et suivantes.

CHAPITRE XVII

DES ACCORDS DISSONNANTS.

Quand, dans des phrases à plusieurs parties, plusieurs d'entre elles sont appelées à se superposer et se mouvoir mélodiquement ensemble, elles doivent, en règle générale, former entre elles des consonnances. En effet, ce n'est que dans ce cas que les sensations auditives qui leur correspondent peuvent se combiner sans se nuire ; dès qu'il y a dissonnance, les divers sons se gênent réciproquement, chacun d'eux entrave la perception régulière des autres. A cette raison plutôt esthétique, vient s'ajouter une autre se rattachant purement à la sensation, à savoir que les consonnances des sons simultanés impriment aux nerfs de l'audition une excitation douce, agréable, régulière, qui se distingue de celle due à l'effet d'un son unique par une variété plus grande, tandis que les dissonnances, par la nature intermittente de leur action, communiquent aux nerfs un ébranlement qui les tourmente et les épuise.

Néanmoins, la règle, qui veut que les diverses parties d'une phrase musicale forment entre elles des consonnances, n'est pas sans souffrir d'exceptions. Le motif esthétique de cette règle ne peut mettre obstacle à ce que, sous certaines conditions, et pendant peu de temps, les différentes parties ne forment des dissonnances, pourvu, d'ailleurs, que, par la nature même de la disposition qu'on leur donne, on ait soin de laisser toute la clarté possible à la marche ultérieure des parties juxtaposées. Par conséquent, à la loi générale de la gamme et de la tonalité, à laquelle est soumis le mouvement mélodique des parties, viennent encore s'ajouter des lois particulières pour leur marche dans les accords dissonnants. De plus, le motif tiré de la sensation agréable produite par les consonnances ne peut exclure entièrement les dissonnances. En effet, quoique l'impression agréable éprouvée par les sens soit un puissant auxiliaire de la beauté esthétique, ces deux choses ne s'identifient pourtant pas l'une avec l'autre. Dans tous les arts, au contraire, il nous faut l'opposé ; il faut souvent que les sens soient affectés d'une manière pénible, soit pour faire mieux ressortir par le contraste le charme de la première impression, soit pour arriver à une expression passionnée plus énergique. C'est dans le même but que les dissonnances sont employées en musique. Elles devien-

nent soit un moyen de contraste pour renforcer l'impression des consonnances, soit un moyen d'expression, et cela non-seulement pour certains mouvements particuliers de l'âme ; elles servent aussi, d'une manière tout à fait générale, à renforcer l'impression de l'activité et de la marche en avant du mouvement musical, parce que l'oreille, tourmentée par les dissonnances, aspire de nouveau au calme, au flux pur et régulier des sons formant consonnance. Dans ce dernier sens, elles trouvent, surtout immédiatement avant la fin du morceau, à remplir un rôle d'une nature importante ; aussi sont-elles à cette place, déjà régulièrement employées par les anciens maîtres de la musique polyphone du moyen âge. Mais cette raison même de leur emploi veut que les parties soient conduites de manière à faire sentir dès l'abord à l'auditeur, combien elles tendent vers une terminaison consonnante, qui peut être ajournée ou même évitée, mais dont le pressentiment peut seul justifier l'existence des accords dissonnants.

Tout rapport irrationnel possible entre les sons donnant une dissonnance, il n'y a que le nombre des consonnances de limité, parce que le nombre des accords dissonnants possibles serait indéfini, si les parties qui forment l'accord dissonnant n'obéissaient pas individuellement, d'après les considérations exposées plus haut, à la loi du mouvement mélodique, c'est-à-dire si elles n'étaient pas assujetties à se mouvoir dans l'intérieur de la gamme. Les consonnances ont, par elles-mêmes, le droit d'exister ; c'est d'après elles que se sont formées nos gammes modernes. Les dissonnances, au contraire, ne sont admises que comme transitions entre des consonnances. Elles n'ont aucun droit logique à l'existence, et, en les traversant, les parties restent par conséquent soumises, pour parcourir les degrés de la gamme, à la loi établie pour favoriser les consonnances.

En passant à l'énumération des divers intervalles dissonnants, je ferai remarquer qu'en général, dans la musique théorique, on considère, comme formes normales, les renversements des accords dissonnants dans lesquels les sons forment entre eux une série de tierces. C'est la règle, notamment pour les accords de septième, formés du son fondamental, de la tierce, de la quinte et de la septième. Ces notes forment entre elles des tierces. Nous pouvons donc considérer les quintes comme formées de deux tierces, et les septièmes de trois. Le renversement des tierces, des quintes et des septièmes, donne des sixtes, des quartes et des secondes. Nous trouvons donc, de cette manière, tous les intervalles compris dans la gamme.

En employant la notation expliquée plus haut, on voit facilement de combien diffèrent entre eux les divers intervalles de même nom. Nous rappelons seulement que $\underline{ut}$ est plus bas d'un comma que *ut*

et plus haut de la même quantité que $\underline{\underline{ut}}$; $\overline{ut}$ est plus haut de un comma que *ut*, etc... Le comma est environ la cinquième partie d'un demi-ton. Pour donner à la fois un aperçu et de la grandeur et de la dureté des intervalles dissonnants, j'ai construit la figure 53 dans laquelle la courbe de dureté est copiée de la figure 52 A. La ligne XY représente l'intervalle d'une octave, où les divers intervalles consonnants et dissonnants ont été reportés suivant l'étendue qu'ils occupent dans la gamme. Au-dessous de cette ligne, sont figurés les douze demi-tons égaux de la gamme tempérée, et au-dessus, les intervalles consonnants et dissonnants de la gamme naturelle. Il faut toujours compter l'étendue de l'intervalle, à partir du point X jusqu'à la ligne verticale considérée. Les ordonnées qui correspondent aux consonnances sont prolongées jusqu'en haut du dessin, celles des dissonnances, au contraire, sont tenues plus courtes. La portion de l'ordonnée, comprise jusqu'au point où elle coupe la courbe de dureté, correspond à la dureté que donnerait l'assemblage de sons considérés, exécutés sur le violon.

En ordonnant les sons de la gamme par tierces, nous trouvons les tierces, les quintes et les septièmes du ton.

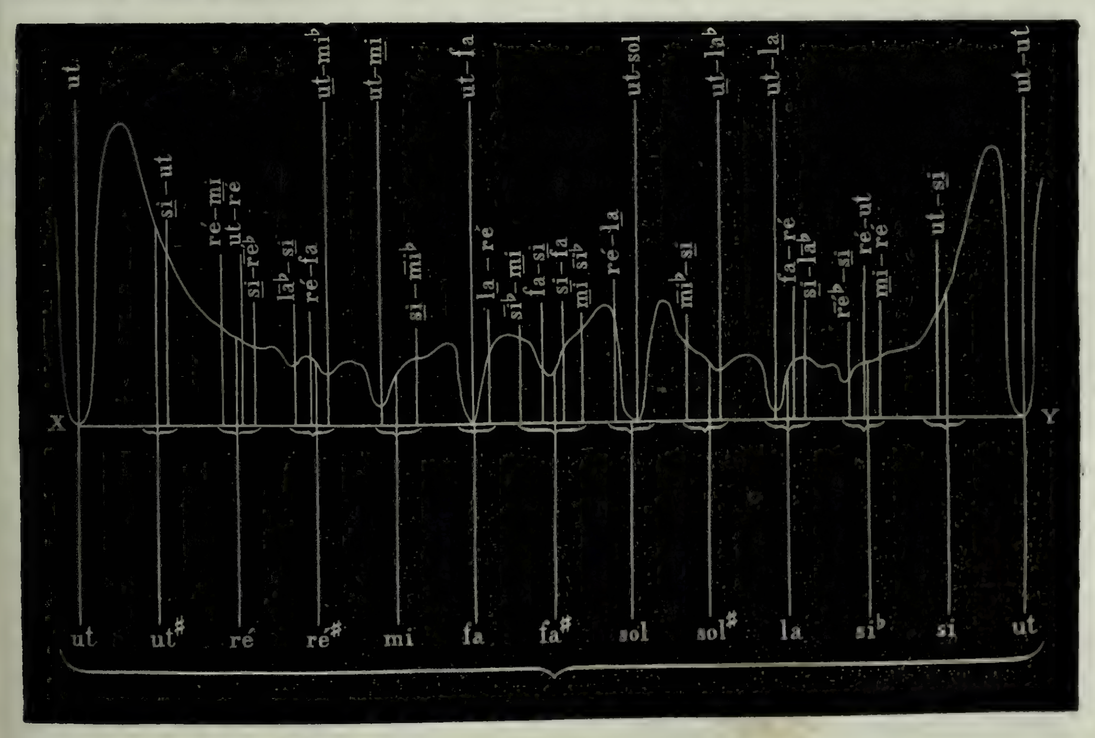


Fig. 53.

A. *Gamme majeure :*

si — ré | fa — la — ut — mi — sol — si — ré | fa — la

$\frac{6}{5}$ $\frac{32}{27}$ $\frac{5}{4}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{5}{4}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{5}{4}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{32}{27}$ $\frac{5}{4}$;

B. *Gamme mineure :*

$$\underline{si} — ré \;|\; fa — \overline{la}\flat — ut — \overline{mi}\flat — sol — \underline{si} — ré \;|\; fa — \overline{la}\flat$$

$$\frac{6}{5} \quad \frac{32}{27} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{32}{27} \quad \frac{6}{5}.$$

On a pris pour la gamme mineure la forme usitée avec septième majeure, parce que la gamme à septième mineure ne donne pas d'autres intervalles que la gamme majeure.

I. Tierces et sixtes.

Dans la gamme naturelle, majeure ou mineure, on voit, par le tableau qui précède, qu'il existe trois espèces de tierces donnant, par le renversement, autant d'espèces de sixtes, savoir :

1° La *tierce majeure naturelle* $\frac{5}{4}$ et son renversement, la *sixte mineure* $\frac{8}{5}$, toutes deux consonnantes.

2° La *tierce mineure naturelle* $\frac{5}{6}$ et son renversement, la *sixte majeure* $\frac{5}{3}$, toutes deux consonnantes.

3° La *tierce mineure pythagoricienne* $\frac{32}{27}$ formée par les sons-limites du ton de *ré* et de *fa*. Si l'on prenait un $\overline{ré}$ au lieu du *ré*, on aurait le même intervalle entre le $\underline{si}$ et le $\underline{ré}$. En comparant cette tierce dissonnante *ré* — *fa* à la tierce mineure consonnante $\underline{ré}$ — *fa*, sous le rapport de la grandeur, on trouve que la première est plus petite que la seconde d'un comma, parce que le *ré* est au-dessus du $\underline{ré}$ de cette même quantité. Comme harmonie, la tierce mineure pythagoricienne vient un peu après la tierce mineure naturelle, mais leur différence, sous ce rapport, n'est pas aussi grande qu'entre les deux tierces majeures correspondantes. Cette différence provient d'abord de ce que la tierce majeure est une consonnance plus parfaite que la tierce mineure, et par conséquent perd plus à être faussée. Mais il y a aussi une différence dans les sons résultants. La tierce mineure naturelle $\underline{ré}_4 — fa_4$ a pour son résultant le $si\flat_1$; elle se réduit donc à un accord naturel en *si*♭ majeur. La tierce pythagoricienne $ré_4 — fa_4$ donne le son résultant $\underline{la}_1$ et se transforme en *ré* — *fa* — $\underline{la}$, qui ne correspond à aucun accord mineur exactement juste. Mais comme la quinte fausse $\underline{la}_1$ ne sonne que faiblement dans les sons résultants graves, la différence est à peine sensible. En outre, il est, pratiquement, presque impossible de déterminer l'intervalle avec assez d'exactitude pour que le son résultant soit $\underline{la}$ et non *la*. Pour la tierce pythagoricienne

majeure $\underline{ut}_3$ — $\underline{mi}_3$, au contraire, le son résultant est $\underline{ut\sharp}_1$, ce qui est naturellement beaucoup plus mauvais que la quinte un peu fausse *la* dans la combinaison *ré* — *fa*.

La tierce majeure pythagoricienne n'intervient pas dans les intervalles réclamés dans la gamme par la musique harmonique. Si, dans la gamme mineure, on voulait utiliser le *si*♭ au lieu du $\overline{si\flat}$, *si*♭ — *ré* serait une tierce de cette nature.

Le renversement de la tierce *fa* — *ré* est la *sixte majeure pythagoricienne fa — ré*, $\frac{27}{16}$ plus grande d'un comma que la sixte majeure naturelle, à laquelle elle est très-inférieure en harmonie, comme le montre nettement la figure 53.

II. Quintes et quartes.

Les quintes se composent simplement de deux tierces ; selon la manière dont nous disposons ces dernières, nous avons les différente espèces de quintes.

4° La *quinte naturelle* $\frac{3}{2}$, formée d'une tierce majeure et d'une tierce mineure naturelles. Son renversement est la *quarte naturelle* $\frac{4}{3}$; toutes deux consonnantes. Exemples, dans la gamme majeure : *fa* — *ut*, $\underline{la}$ — $\underline{mi}$, *ut* — *sol*, $\underline{mi}$ — $\underline{si}$, *sol* — *ré*.

5° La *quinte altérée ré* — $\underline{la}$, $\frac{40}{27}$, plus petite d'un comma que la quinte naturelle *ré* — *la*, formé d'une tierce mineure et d'une tierce majeure pythagoriciennes. Elle sonne comme une quinte mal accordée, et donne naissance à des battements fort nettement perceptibles. Dans l'octave d'indice 2, le nombre de ces coups est de onze à la seconde. Son renversement est la *quarte altérée* $\underline{la}$ — *ré*, $\frac{27}{20}$, qui est aussi nettement dissonnante. La quarte $\underline{la}_0$ — $ré_1$ donne autant de coups forts que la quinte $ré_1$ — la_1 pour un même *ré*.

6° La *fausse quinte* $\underline{si}$ — *fa*, $\frac{64}{45}$, formée de deux tierces mineures, l'une naturelle $\underline{si}$ — *ré*, l'autre pythagoricienne *ré* — *fa*, et, par conséquent, comme l'indique déjà la notation, inférieure à la quinte naturelle d'environ un demi-ton. C'est une dissonnance assez dure, à peu près sur le même rang que la seconde majeure. Son renversement, la *fausse quarte* ou le *triton*, *fa* — $\underline{si}$ (contenant *trois* tons *fa* — *sol*, *sol* — $\underline{la}$, $\underline{la}$ — $\underline{si}$), $\frac{45}{32}$, présente à peu près la même dureté, et est d'environ un comma plus grande que la quarte. En effet, la fausse quinte $\underline{si}$ — *fa* est égale à *ut*♭ — *fa*, et en diminuant cet inter-

valle d'un comma, on a *ut*♭ — $\underline{fa}$, qui est une fausse quarte. Exactement parlant, comme l'*ut*♭ ne coïncide pas tout à fait avec le $\underline{si}$, la différence entre les deux intervalles est un peu plus faible qu'un comma $\frac{81}{80}$; elle est de $\frac{2048}{2025}$, ou, pour abréger, $\frac{89}{88}$. Toutes deux se confondent sur les instruments à clavier.

7° La *quinte augmentée* du ton mineur $\overline{mi}$♭ — $\underline{si}$, $\frac{25}{16}$, formée de deux tierces majeures $\overline{mi}$♭ — *sol*, et *sol* — $\underline{si}$. Elle est d'environ deux commas, inférieure à la sixte mineure, comme on le voit si l'on remplace le $\underline{si}$ par son équivalent approché *ut*♭. Donc $\overline{mi}$♭ — $\underline{si}$ est égal à $\overline{mi}$♭ — *ut*♭; or la sixte mineure consonnante est $\underline{mi}$♭ — *ut*♭, et $\overline{mi}$♭ est de deux commas plus haut que $\underline{mi}$♭. La quinte augmentée est sensiblement plus dure que la sixte mineure naturelle, avec laquelle elle coïncide sur les instruments à clavier. Son renversement, la *quarte diminuée* $\underline{si}$ — $\overline{mi}$♭, $\frac{32}{25}$, est d'environ deux commas plus haute que la tierce majeure naturelle, et considérablement plus dure, mais elle coïncide avec elle sur les instruments à clavier.

Deux tierces mineures, naturelles ou pythagoriciennes, ne peuvent pas être juxtaposées dans la suite naturelle des tierces de la gamme majeure ou de la gamme mineure. Dans les modes de septième ou de quarte, on peut former les intervalles $\underline{la}$ — $\overline{mi}$♭ et $\underline{mi}$ — $\overline{si}$♭, $\frac{36}{25}$, composés de deux tierces mineures naturelles. Ils sont d'un comma plus grands que les fausses quintes ordinaires $\underline{si}$ — *fa* (ou $\underline{la}$ — *mi*♭ en *si*♭ majeur, *mi* — *si*♭ en *fa* majeur), et notablement plus durs qu'elle.

III. Septièmes et secondes.

Trois tierces superposées donnent des septièmes; en commençant par les plus petites tierces, nous obtenons les valeurs suivantes pour la septième :

8° La *septième diminuée*, en mineur, $\underline{si}$ — $\overline{la}$♭ $=$ $\underline{si}$ — *ré* + *ré* — *fa* + *fa* — $\overline{la}$♭, composée de trois tierces mineures, dont deux naturelles et une pythagoricienne. Le rapport numérique est $\frac{128}{75}$; elle est d'environ deux commas plus grande que la sixte majeure, comme on le voit, si on pose $\underline{si}$ — $\overline{la}$♭ $=$ *ut*♭ — $\overline{la}$♭. L'intervalle $\underline{ut}$♭ — *la*♭, plus petit de deux commas, serait une sixte majeure naturelle. La dissonnance $\underline{si}$ — $\overline{la}$♭ est assez mordante, assez dure, analogue à la sixte majeure pythagoricienne qui est plus petite d'un comma. Son renver-

sement, au contraire, la *seconde augmentée* n'est pas beaucoup plus dure que la tierce mineure naturelle. Sa valeur numérique $\frac{75}{64}$ est très-voisine du rapport $\frac{7}{6}$ $\left(\frac{75}{64} = \frac{7}{6} \cdot \frac{225}{224}\right)$. Si, par une extension, on transforme cette seconde en neuvième, $\frac{7}{3}$, on a un intervalle assez harmonieux, à peu près autant que la consonnance très-imparfaite, il est vrai, de dixième mineure.

9° La *petite septième mineure sol — fa*, $\underline{si}$ — $\underline{la}$ ou *ré — ut*, formée d'une tierce majeure naturelle et de deux tierces mineures, l'une naturelle, l'autre pythagoricienne : *sol — fa* = (*sol* — $\underline{si}$) + $\underline{si}$ — *ré* + (*ré — fa*). C'est une dissonnance relativement douce, plus douce que la septième diminuée, ce qui est très-important pour l'action de l'accord de septième de dominante qui renferme cette septième. De toutes les septièmes, c'est la plus voisine de la septième naturelle $\frac{7}{4}$; elle ne s'en rapproche cependant pas autant que l'intervalle de sixte augmentée dont nous allons parler plus bas. J'ai déjà expliqué précédemment que la septième naturelle ne le cède pas en harmonie aux consonnances. Le renversement de la petite septième mineure est le *ton majeur ut — ré*, $\underline{la}$ — $\underline{si}$ *fa — sol*, $\frac{9}{8}$, qui forme une énergique dissonnance.

10° La *grande septième mineure* $\underline{mi}$ — *ré*, $\underline{la}$ — *sol*, $\frac{9}{5}$, supérieure à la précédente d'un comma, est sensiblement plus mordante parce qu'elle se rapproche davantage de l'octave ; elle est presque aussi dure que la septième diminuée. Elle est formée d'une tierce majeure et de deux tierces mineures, toutes trois naturelles : $\underline{mi}$ — *ré* = ($\underline{mi}$ — *sol*) + (*sol* — $\underline{si}$) + ($\underline{si}$ — *ré*). La petite septième mineure doit avoir la basse fondamentale du côté de la susdominante, et la septième, du côté de la sous-dominante du ton, parce qu'elle renferme la tierce pythagoricienne *ré — fa*.

Inversement, la grande septième mineure a sa septième du côté de la susdominante. Son renversement, le *ton mineur*, $\frac{10}{9}$, *ré* — $\underline{mi}$, *sol* — $\underline{la}$, est un peu plus mordant, comme accord, que le ton majeur.

11° La *septième majeure fa* — $\underline{mi}$, *ut* — $\underline{si}$, $\frac{15}{8}$, formée de deux tierces majeures et d'une tierce mineure, toutes trois naturelles, *ut* — $\underline{si}$ = (*ut* — $\underline{mi}$) + ($\underline{mi}$ — *sol*) + (*sol* — $\underline{si}$). C'est une dissonnance mordante, à peu près au même degré que le ton mineur. Son renversement, la *seconde mineure* ou le *demi-ton*, $\frac{16}{15}$, est le plus dissonnant de tous les intervalles de la gamme.

On pourrait obtenir, dans le mode de quarte ou de septième, une septième majeure un peu différente, $\overline{si}\flat$ — $\underline{la}$, d'un comma inférieure à la septième majeure ordinaire, et, par conséquent, un peu moins dure.

Il faut enfin mentionner un intervalle particulier au mode dorien, savoir :

12° La *sixte augmentée* $\overline{ré}\flat$ — $\underline{si}$, qui, dans ce mode, naît de l'union de la seconde mineure caractéristique $\overline{ré}\flat$ — avec la sensible $\underline{si}$. La valeur de l'intervalle est $\frac{225}{128}$; c'est environ un comma de moins que la septième mineure de l'accord de septième de dominante, comme on le voit, en posant $\overline{ré}\flat$ — $\overline{si}$ = *ré*♭ — *ut*♭; *ré*♭—*ut*♭ serait une petite septième mineure, mais le $\overline{ré}\flat$ est d'un comma plus haut que le *ré*♭. On peut considérer la sixte augmentée comme formée de deux tierces majeures et d'un ton :

$$\overline{(\textit{ré}\flat - \textit{fa})}\ (\textit{fa} - \textit{sol}) + (\textit{sol} - \underline{\textit{si}}) = \overline{(\textit{ré}\flat} - \underline{\textit{si}}).$$

Cet intervalle est aussi harmonieux que la sixte mineure, parce qu'il correspond presque exactement à l'intervalle naturel $\frac{7}{4}$. En effet, $\frac{225}{128} = \frac{7}{4} \cdot \frac{225}{224}$. Seule, par conséquent, la sixte augmentée peut être considérée comme dissonnante, mais elle ne se prête à aucune combinaison consonnante, et ne peut, par suite, former d'accords consonnants. Par le renversement, elle change en *tierce diminuée* $\frac{256}{225}$ ou à peu près $\frac{8}{7}$; l'intervalle est alors notablement plus mauvais, comme on l'a déjà remarqué plus haut, mais on l'améliore en élevant le $\underline{si}$ d'une octave, ce qui donne à peu près l'intervalle $\frac{7}{2}$. Le voisinage de la septième naturelle et l'harmonie relative paraissent être ce qui a maintenu dans les cadences cet intervalle singulier, réfractaire à notre système musical actuel, et, à cet égard, il est caractéristique que son renversement, la tierce diminuée, qui diminue l'harmonie, en soit proscrit, tandis que l'extension à la dixième est permise. Sur les instruments à clavier,, cet intervalle coïncide avec la septième mineure.

On voit d'un coup d'œil, sur la figure 53, quelle extraordinaire confusion règne entre les différents intervalles sur les instruments à clavier. Au-dessous de la ligne de base x — y, sont marqués les points correspondant aux sons du tempérament, et les petites accolades, le long de la ligne xy, comprennent les sons qui sont exprimés par la même

note de la gamme tempérée. Sur le piano, l'intervalle *$\underline{si}$ — $\overline{la}\flat$* se confond avec la sixte majeure *ut$\flat$ — $\underline{la}\flat$*; l'intervalle *$\overline{ré}\flat$ — $\underline{si}$*, au contraire, doit être pris plus grand d'un demi-ton, bien qu'il diffère du premier intervalle d'une quantité à peine plus grande que celle qui distingue *$\underline{si}$ — $\overline{la}\flat$* de la sixte majeure. La figure montre notamment très-bien la grande différence d'harmonie qui existe entre l'intervalle *ut — $\underline{la}$* et *fa — ré* ou *si — $\overline{la}\flat$*, tandis que tous trois sont exprimés par le son assez mordant de l'intervalle tempéré *ut — la*. L'harmonium à double clavier permet au contraire d'exécuter exactement tous ces intervalles.

ACCORDS DISSONNANTS DE TROIS SONS.

Nous obtenons des accords dissonnants de trois sons à une seule dissonnance, en superposant à un même son fondamental deux consonnances dissonnantes entre elles. Ainsi :

1° Quinte et quarte : *ut — fa — sol*;

2° Tierce et quarte : *ut — $\underline{mi}$ — fa* ou *ut — $\overline{mi}\flat$ — fa*;

3° Quinte et sixte : *ut — sol — $\underline{la}$* ou *ut — $\overline{sol}$ — la$\flat$*;

4° Tierce et sixte, l'une majeure, l'autre mineure, *ut — mi$\flat$ $\underline{la}$* ou *ut — $\underline{mi}$ — $\overline{la}\flat$*.

Dans tous les cas, l'*ut* est consonnant avec les deux autres sons. Le premier accord joue seul un rôle important, sous le nom de *retard*, surtout dans l'ancienne musique polyphone. Nous retrouverons plus tard les autres comme faisant partie des accords de septième.

Dans la musique moderne, les accords de trois sons *à deux dissonnances*, qui embrassent les sons limites du ton, ont plus d'importance. Dans le système des accords du ton, les tierces majeures et mineures se suivent alternativement, et la réunion de deux intervalles voisins donne des accords consonnants. Mais, entre les sons limites *ré* et *fa*, l'intervalle est d'une tierce mineure pythagoricienne, et en réunissant cette dernière à l'une des tierces voisines, on obtiendra un accord dissonnant :

En majeur : *ut — $\underline{mi}$ — sol — $\underline{si}$ — ré* | *fa — $\underline{la}$ — ut — $\underline{mi}$ — sol.*

$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{32}{27}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$

En mineur : *ut — $\overline{mi}\flat$ — sol — $\underline{si}$ — ré* | *fa — $\overline{la}\flat$ — ut — $\overline{mi}\flat$ — sol.*

$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{32}{27}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$.

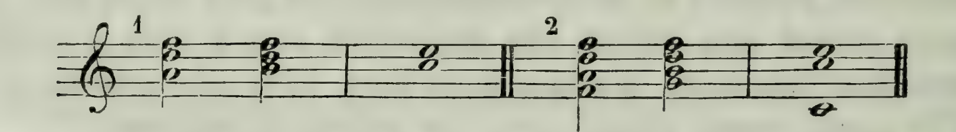
Le mode majeur donne deux accords de trois sons de la forme :

$$\underline{si} - ré - fa \quad \text{et} \quad ré - fa - \underline{la}$$
$$\frac{6}{5} \quad \frac{32}{27}. \qquad \frac{32}{27} \quad \frac{5}{4},$$

le mode mineur :

$$\underline{si} - ré - fa \quad \text{et} \quad ré - fa - \overline{la}\flat$$
$$\frac{6}{5} \quad \frac{32}{27} \qquad \frac{32}{27} \quad \frac{6}{5}.$$

Dans les deux accords *si — ré — fa* et *ré — fa — la*♭, qui réunissent les tierces mineures naturelles et pythagoriciennes, les fausses quintes *si — fa* et *ré — la*♭ viennent augmenter encore le nombre et la force des dissonnances, plus que ne le ferait la tierce $\frac{32}{27}$; on les appelle *accords diminués*. L'accord *ré — fa — la*, bien qu'ayant, dans la notation, l'apparence de l'accord mineur *ré — fa — la*, et qu'on puisse l'appeler pour cette raison *accord mineur faux*, est dissonnant, comme l'a bien montré Hauptmann ; c'est très-nettement sensible sur un instrument juste. Il est à peine moins dur que l'accord *si — ré — fa*. Si, en *ut* majeur, on fait la cadence 1 ou 2, sans changer le *ré* en *ré*.



les accords *la — ré — fa* et *— fa — la — ré — fa* sont tout aussi dissonnants que les suivants *si — ré — fa* et *sol — si — ré — fa*. Sur nos instruments de musique faux, on ne peut obtenir cet effet qu'en réunissant, dans la cadence, à la sous-dominante, un accord de septième renversé *fa — la — ut — ré*. Hauptmann doute que, dans l'appplication, on puisse distinguer l'accord mineur faux d'*ut* majeur de l'accord de *ré* — mineur. Je trouve que cette distinction se fait très-nettement et d'une manière incontestable sur mon harmonium juste, mais j'admets qu'il serait difficile d'attendre des chanteurs l'intonation juste. Involontairement, ils passeront à l'accord mineur juste, si, dans la partie qui donne le *ré*, l'affinité avec la dominante *sol* n'est pas fortement accusée.

Quand on joue dans la gamme naturelle, il est souvent assez difficile de choisir entre le *ré* et le *ré*. Dans le commencement j'étais dis-

posé à toujours confondre l'accord *fa* — $\underline{\text{la}}$ — *ré* avec l'accord consonnant *fa* — $\underline{\text{la}}$ — $\underline{\text{ré}}$; ensuite je me suis habitué au premier, et maintenant je préfère ordinairement maintenir le *ré* allié du *sol*, qui n'accuse pas une tendance marquée vers le ton de *ré* mineur. Mais l'accord *fa* — $\underline{\text{la}}$ — *ré* agit comme une dissonnance bien marquée et demande une résolution. Employé comme une terminaison, avant un silence, il serait intolérable.

Ces accords, et surtout l'accord $\underline{\text{si}}$ — *ré* — *fa*, ont encore, au point de vue musical, une importance toute particulière ; ils comprennent les sons caractéristiques qui distinguent le ton du morceau des tons les plus voisins, et déterminent ainsi, d'une manière très-précise, la tonalité dans laquelle se meut l'harmonie au moment où ils se présentent. Si cette dernière passe en *sol* majeur ou en *sol* mineur, le *fa* est remplacé par un $\underline{\text{fa}\sharp}$. Si elle passe en *fa* majeur, le *ré* se change en $\underline{\text{ré}}$ ou en $\overline{\text{ré}}\flat$ en *fa* mineur, en outre, le *si*♭ vient remplacer le $\underline{\text{si}}$ dans un dernier cas. Ainsi :

en *sol* majeur :	$\underline{\text{si}}$ — *ré* — $\underline{\text{fa}\sharp}$	*ré* — $\underline{\text{fa}\sharp}$ — *la*
en *ut* majeur :	$\underline{\text{si}}$ — *ré* — *fa*	*ré* — *fa* — $\underline{\text{la}}$
en *fa* majeur :	*si*♭ — $\underline{\text{ré}}$ — *fa*	$\underline{\text{ré}}$ — *fa* — $\underline{\text{la}}$
en *sol* mineur :	*si*♭ — *ré* — $\underline{\text{fa}\sharp}$	*ré* — $\underline{\text{fa}\sharp}$ — *la*
en *ut* mineur :	$\underline{\text{si}}$ — *ré* — *fa*	*ré* — *fa* — $\overline{\text{la}}\flat$
en *fa* mineur :	*si*♭ — $\overline{\text{ré}}\flat$ — *fa*	$\overline{\text{ré}}\flat$ — *fa* — $\overline{\text{la}}\flat$.

On voit que ces accords se distinguent nettement dans les tons les plus voisins, à l'exception de *ré* — *fa* — $\underline{\text{la}}$ et de $\underline{\text{ré}}$ — *fa* — $\underline{\text{la}}$, dont la distinction offrirait des difficultés dans la pratique. Les deux autres sont plus nettement caractérisés par ceux des tonalités les plus voisines. En revanche,

$$\underbrace{\underline{\text{si}} - \text{ré}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{\;-\;\text{fa}}_{\frac{32}{27}} \quad \text{et} \quad \underbrace{\underline{\text{ré}} - \underline{\text{fa}}}_{\frac{32}{27}}\underbrace{\;-\;\text{la}\flat}_{\frac{6}{5}}$$

se changeraient facilement en

$$\underbrace{\underline{\text{si}} - \underline{\text{ré}}}_{\frac{32}{27}}\underbrace{\;-\;\text{fa}}_{\frac{6}{5}} \quad \text{et} \quad \underbrace{\underline{\text{ré}} - \text{fa}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{\;-\;\text{la}\flat}_{\frac{32}{27}}$$

dont le premier appartient au ton de $\underline{\text{la}}$ mineur, et le second à celui

de *mi*♭ majeur ou mineur. Or, le ton de *la* mineur est la tonalité mineure la plus voisine d'*ut* majeur, et le ton de *mi*♭ majeur la tonalité majeure la plus voisine d'*ut* mineur.

Et, enfin, si l'on considère que la tierce mineure pythagoricienne $\frac{32}{27}$ est encore moins éloignée de la seconde augmentée $\frac{75}{64}$ que de la tierce mineure normale $\left(\frac{32}{27} = \frac{6}{5} \times \frac{81}{80}\right.$ et $\frac{32}{27} = \frac{75}{64} \cdot \frac{2048}{2025}$, ou par approximation $\left.\frac{32}{27} = \frac{75}{64} \cdot \frac{89}{88}\right)$, l'accord de trois sons *si* — *ré* — *fa* peut, par une altération relativement faible, se changer en

si — *ré* — *mi*♯ et *ut*♭ — *ré* — *fa*

$\frac{6}{5}$ $\frac{75}{64}$ $\qquad$ $\frac{75}{64}$ $\frac{6}{5}$

qui appartiennent aux tons de *fa*♯ mineur et de *mi*♭ mineur. L'accord diminué de trois sons *si* — *ré* — *fa* peut donc, par des altérations qui ne dépassent pas $\frac{81}{80}$, se rapporter aux tons de

ut majeur, *ut* mineur, *la* mineur, *fa*♯ mineur et *mi*♭ mineur.

Par conséquent, si l'emploi de l'accord *si* — *ré* — *fa* exclut les tonalités immédiatement voisines d'*ut*, une altération peut cependant en faire arriver de plus éloignées. Si donc nous cherchons à déterminer complétement le ton au moyen de ces accords, il faut ajouter un quatrième son, il faut donner quatre sons à l'accord, ce qui nous conduit aux accords de septième.

ACCORDS DE SEPTIÈME.

A. **Accords formés de deux accords consonnants de trois sons.**

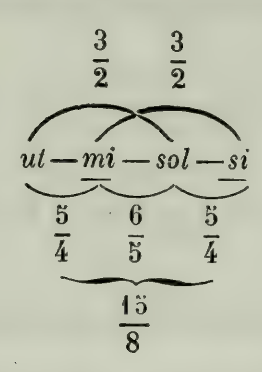
On a montré plus haut qu'on ne pouvait donner quatre parties aux accords consonnants sans doubler l'un des sons à l'octave, mais il n'en est pas de même des accords dissonnants. La catégorie la moins dissonnante de ces derniers est celle où il n'y a qu'une dissonnance au milieu de consonnances. La manière la plus simple de les former consiste à prendre deux accords consonnants de trois sons qui ont une note commune. Quand on les relie ensemble, les notes distinctes sont dissonnantes, tout le reste est consonnant, en sorte que la dissonnance est relativement peu sensible au milieu de la quantité des autres notes consonnantes. Ainsi les accords

ut — mi — sol
mi — sol — si

réunis, donnent l'accord de quatre sons

ut — mi — sol — si,

où la septième majeure *ut — si* forme seule un intervalle dissonant; tous les autres sont consonnants, comme on le voit par le tableau suivant de leurs valeurs numériques :



Ce renversement de l'accord de septième, formé par des accords non renversés de trois sons, est considéré comme la forme fondamentale. Les intervalles entre deux notes consécutives y sont des tierces, et, si nous formons des accords de septième au moyen des accords consonnants de la gamme, ces tierces doivent être alternativement majeures et mineures, parce que c'est toujours ainsi qu'elles se présentent dans les accords consonnants. Hauptmann donne à ces accords de septième qui existent déjà tout formés dans la suite naturelle des tierces du ton

fa — la — ut — mi — sol — si — ré

le nom d'*accords du système direct*. La seule différence entre eux consiste en ce que la tierce mineure peut être encadrée de deux tierces majeures, comme dans l'accord déjà cité *ut — mi — sol — si* et son analogue *fa — la — ut — mi* en *ut* majeur, et *la*♭ *ut — mi*♭ *— sol* en *ut* mineur, ou bien, au contraire, que la tierce majeure peut occuper le milieu, comme dans

$\frac{3}{2}$ $\frac{3}{2}$

la — ut — mi — sol

$\frac{6}{5}$ $\frac{5}{4}$ $\frac{6}{5}$

$\frac{9}{5}$

et dans ses analogues *mi* — *sol* — *si* — *ré* d'*ut* majeur, et *fa* — *la*♭ — *ut* — *mi*♭ — d'*ut* mineur. Ces derniers ont comme dissonnance la septième mineure beaucoup plus douce que la septième majeure.

B. Accords de septième formés d'accords dissonnants.

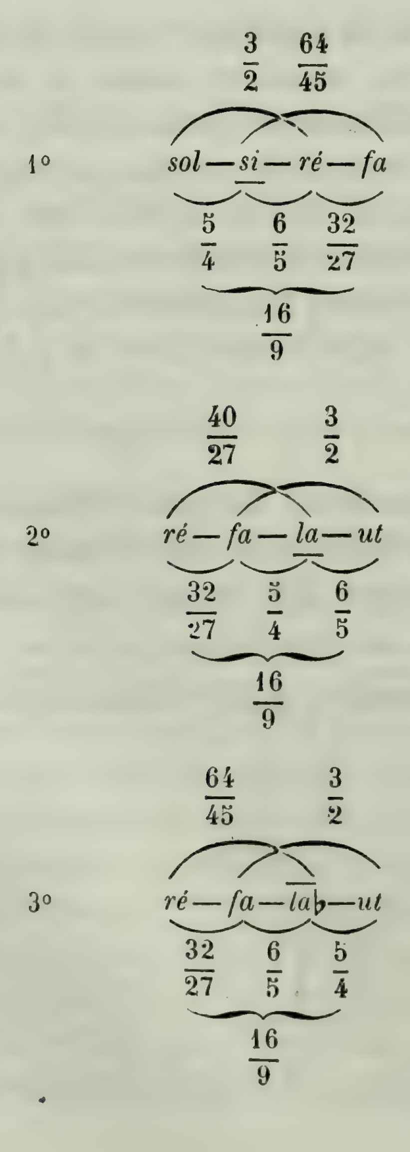
On peut former d'autres accords de septième avec les accords dissonnants caractéristiques du ton, unis à un accord consonnant, ou même à un autre accord dissonnant. Ainsi les combinaisons des accords du ton

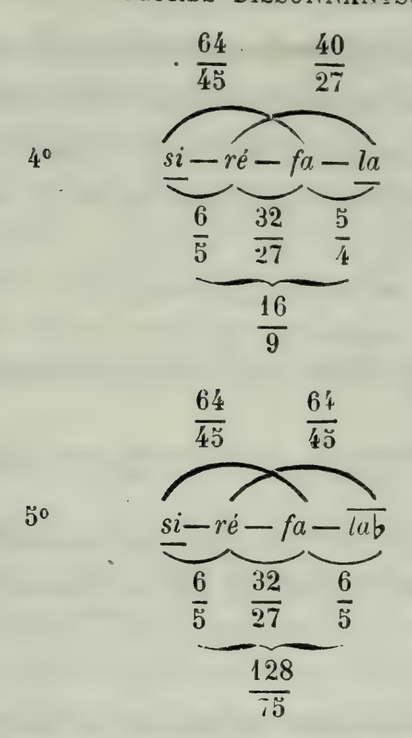
ut — *mi* — *sol* — *si* — *ré* | *fa* — *la* — *ut*

et

ut — *mi*♭ — *sol* — *si* — *ré* | *fa* — *la*♭ — *ut*

nous donnent les séries suivantes d'*accords de septième du système indirect :*





Dans ces accords, qui sont tous assez voisins de la septième naturelle $\frac{7}{4}$, les septièmes sont toutes plus petites que celles des accords de septième formés d'accords consonnants. Les principales dissonnances de nos accords sont les quintes fausses et altérées *si — fa*, *ré — la* et *ré — la*♭, c'est-à-dire les intervalles $\frac{64}{45}$ et $\frac{40}{27}$. Par conséquent, les trois premiers accords de septième *sol — si — ré — fa*, *ré — fa — la — ut* et *ré — fa — la*♭ *— ut*, qui ne contiennent qu'une seule de ces quintes, sont plus doux que les deux derniers qui en renferment deux. Ceux qui contiennent un accord parfait majeur, c'est-à-dire

sol — si — ré — fa et *ré — fa — la — ut*,

sont, au point de vue du mordant de la dissonnance, à peu près au niveau des accords de septième mineure du système direct, qui renferment, il est vrai, une septième mineure plus grande et plus dure, mais qui, à côté, présentent des quintes justes :

la — ut — mi — sol et *mi — sol — si — ré*.

On peut même augmenter encore beaucoup la douceur de l'accord de septième de dominante *sol — si — ré — fa*, en abaissant le *fa* au *fa*. L'intervalle *sol — fa* correspond au rapport $\frac{1280}{729}$ très-voisin du

rapport $\frac{7}{4}$. En effet, on a, approximativement, $\frac{1280}{729} = \frac{7}{4}\,\frac{301}{300}$. L'accord *sol* — $\underline{\textit{si}}$ — *ré* — $\underline{\textit{fa}}$ est à la limite des accords consonnants.

On peut, au contraire, au point de vue de la dureté, rapprocher l'accord de septième qui contient une fausse quinte et un accord parfait mineur

$$\textit{ré} - \textit{fa} - \overline{\textit{la}}\flat - \textit{ut},$$

des accords du système direct qui renferment une septième majeure :

$$\textit{fa} - \underline{\textit{la}} - \textit{ut} - \underline{\textit{mi}} \quad \text{et} \quad \textit{ut} - \underline{\textit{mi}} - \textit{sol} - \underline{\textit{si}}.$$

Ce qu'il y a de remarquable ici, c'est que ces derniers accords ont exactement les mêmes intervalles que *sol* — $\underline{\textit{si}}$ — *ré* — *fa*, seulement renversés. Car on a

$$\underbrace{\textit{ré} - \textit{fa}}_{\frac{32}{27}}\underbrace{- \overline{\textit{la}}\flat}_{\frac{6}{5}}\underbrace{- \textit{ut}}_{\frac{5}{4}} \quad \text{et} \quad \underbrace{\textit{sol} - \underline{\textit{si}}}_{\frac{5}{4}}\underbrace{- \textit{ré}}_{\frac{6}{5}}\underbrace{- \textit{fa}}_{\frac{32}{27}}$$

Mais la partie consonnante du premier accord est un accord mineur, et celle du second un accord majeur ; c'est ce qui fait que le premier est nettement plus dur que le second.

Il faut encore ici chercher l'explication du fait dans les sons résultants dont les plus accusés sont ceux, situés en bas, des petits intervalles. Ce sont, pour

$$\underbrace{\textit{sol} - \underline{\textit{si}}}_{\textit{sol}}\underbrace{- \textit{ré}}_{\textit{sol}}\underbrace{- \textit{fa}}_{\underline{\textit{la}},}$$

et, pour

$$\underbrace{\textit{ré} - \textit{fa}}_{\underline{\textit{la}}}\underbrace{- \overline{\textit{la}}\flat}_{\overline{\textit{ré}}\flat}\underbrace{- \textit{ut}}_{\overline{\textit{la}}\flat}$$

Le premier accord ne présente donc qu'un seul son résultant qui lui soit étranger, le second en présente deux.

Les plus durs sont les accords de septième avec deux fausses quintes, $\underline{\textit{si}}$ — *ré* — *fa* — $\underline{\textit{la}}$ et $\underline{\textit{si}}$ — *ré* — *fa* — $\overline{\textit{la}}\flat$; mais le premier peut devenir assez doux, si on fait subir une petite altération à l'une de ses notes. En prenant, en effet, la forme $\underline{\textit{si}}$ — *ré* — $\underline{\textit{fa}}$ — *la*, l'accord contient des sons compris dans le son complexe *sol*, et qui sonnent assez bien entre eux.

Les accords du système indirect jouent un rôle important dans

les modulations, pour déterminer la tonalité d'une manière précise et durable. Celui qui agit le plus nettement sous ce rapport est l'accord de septième sur la dominante du ton, soit, pour la tonique *ut*, l'accord *sol* — *si* — *ré* — *fa*. Nous avons vu que, par de petits changements d'intonation, l'accord diminué peut s'adapter aux tons d'*ut* majeur, d'*ut* mineur, de *la* mineur, de *fa*♯ mineur et de *mi*♭ mineur. Mais les deux premiers seulement contiennent le *sol*, en sorte que l'accord *sol* — *si* — *ré* — *fa* ne peut se rapporter qu'à la tonique *ut*.

L'accord mineur faux *ré* — *fa* — *la*, qui, dans la gamme naturelle, n'appartient qu'au ton d'*ut*, peut se changer en *ré* — *fa* — *la*, qui peut appartenir à la gamme de *ré* mineur, *la* mineur, de *fa* majeur, de *si*♭ majeur. L'addition de l'*ut* ne peut prévenir ces changements, en sorte que l'accord *ré* — *fa* — *la* — *ut* n'est ordinairement employé dans la cadence qu'alternativement avec l'accord de septième de dominante ; il permet alors de distinguer la gamme d'*ut* majeur de celle d'*ut* mineur. Au contraire, l'addition du *si* à l'accord des trois sons *ré* — *fa* — *la* est caractéristique, parce que la combinaison obtenue permet tout au plus le changement en l'accord *si* — *ré* — *fa* — *la* qui appartient au ton de *la* mineur. Mais l'accord *si* — *ré* — *fa* — *la*, employé au milieu d'accords majeurs, est relativement dur, surtout dans tous les renversements où le *la* n'est pas la note la plus aiguë ; aussi son emploi est-il restreint. On le réunit souvent à l'accord de septième de dominante, comme accord de neuvième *sol* — *si* — *ré* — *fa* — *la*, où le *sol* et le *la* doivent occuper les positions extrêmes. On en parlera plus bas avec plus de détails.

En *ut* mineur, l'accord *ré* — *fa* — *la*♭ qui, dans sa véritable intonation, serait caractéristique par lui-même, peut aussi facilement prendre d'autres formes. Ainsi :

ré — *fa* — *la*♭ appartient au ton d'*ut* mineur
$\frac{32}{27}$ $\frac{6}{5}$

ré — *fa* — *la*♭ appartient au ton de *mi*♭ majeur ou mineur.
$\frac{6}{5}$ $\frac{32}{27}$

ré — *fa* — *sol*♯ appartient au ton de *la* mineur.
$\frac{6}{5}$ $\frac{75}{64}$

ré — *mi*♯ — *sol*♯ appartient au ton de *fa*♯ mineur.

L'addition de l'*ut*, formant l'accord de septième *ré — fa —* $\overline{la}\flat$ *— ut* n'exclurait nettement que le ton de *fa*♯ mineur, et celle du $\underline{si}$, pouvant se changer en *si* ou en $\underline{ut}\flat$, formerait un accord convenant également à tous les tons énumérés plus haut. Ce dernier accord dit de *septième diminuée*, a, sur les instruments à clavier, l'apparence d'une juxtaposition de trois tierces mineures. Mais, en réalité, c'est la combinaison d'une tierce mineure pythagoricienne ou d'une seconde augmentée intercalée entre deux tierces mineures :

$\underline{si}$ — *ré* — *fa* — $\overline{la}\flat$ — $\underline{si}$

$\frac{6}{5}$ $\frac{32}{27}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{75}{64}$

Comme les trois intervalles $\frac{6}{5}$, $\frac{32}{27}$ et $\frac{75}{64}$ ne diffèrent que très-peu, on peut facilement les changer les unes dans les autres, et on obtient les séries suivantes de sons, à peu près équivalentes :

$\underline{si}$ — *ré* — *fa* — $\overline{la}\flat$ — $\underline{si}$ en *ut* mineur.

$\frac{6}{5}$ $\frac{32}{27}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{75}{64}$

si — *ré* — $\overline{fa}$ — $\underline{sol}\sharp$ — *si* en *la* mineur.

$\frac{32}{27}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{75}{64}$ $\frac{6}{5}$

si — $\overline{ré}$ — $\underline{mi}\sharp$ — *sol*♯ — *si* en *fa*♯ mineur.

$\frac{6}{5}$ $\frac{75}{64}$ $\frac{6}{5}$ $\frac{32}{27}$

$\overline{ut}\flat$ — $\underline{ré}$ — *fa* — *la*♭ — $\overline{ut}\flat$ en *mi*♭ mineur.

En mineur, ces accords de septième diminuée ne donnent pas, à côté d'accords consonnants, une dissonnance aussi marquée qu'en majeur, quoique, dans la gamme naturelle, ce soient toujours des dissonnances très-mordantes. Quand ils sont suivis de l'accord de tonique, à eux deux ils comprennent tous les sons de la gamme, et déterminent par conséquent le ton d'une manière très-complète. L'accord de septième diminuée est, d'ailleurs, par les changements qu'il comporte, surtout employé à conduire rapidement dans un nouveau ton éloigné. Par la simple addition de l'accord mineur de *fa*♯, de *la*, d'*ut* ou de *mi*♭ mineurs, la nouvelle tonalité est elle-même complétement déterminée. On reconnaîtra sans peine que cette suite de tons forme elle-même un accord de septième diminuée, dont cha-

que son est plus haut d'un demi-ton que le son correspondant de l'accord considéré. Cette remarque permettra de trouver facilement le ton auquel appartient l'accord. Ces accords qui résument la tonalité, ont une importance particulière dans la cadence qui termine un morceau ou une phrase principale. Nous devons donc encore déterminer quels sons fondamentaux les accords de septième peuvent représenter.

Il faut bien remarquer à ce sujet, que les sons d'un accord dissonnant ne peuvent jamais, ou seulement d'une manière imparfaite, représenter un seul son complexe ; mais on peut, en général, grouper quelques-uns d'entre eux comme parties constitutives d'un son complexe. De là naît une distinction pratique entre les différentes notes d'un accord de ce genre. En effet, celles qui peuvent être considérées comme les éléments d'un son complexe, forment entre elles un ensemble bien déterminé en soi. En revanche, les notes qui n'entrent pas dans ce tout, apparaissent comme des sons isolés, juxtaposés par hasard. Les musiciens les désignent sous le nom de *dissonnances* ou *notes dissonnantes* de l'accord. Naturellement, dans un intervalle dissonnant, les deux sons dissonnent aussi bien l'un que l'autre, et il n'y aurait aucun sens à vouloir considérer un seul d'entre eux comme dissonnant, s'il ne venait s'en ajouter d'autres. Dans la septième *ut* — *si*, par exemple, *ut* et *si* sont également dissonnants l'un par rapport à l'autre. Dans l'accord *ut* — *mi* — *sol* — *si*, au contraire, *ut* — *mi* — *sol*, forme un seul tout sonore, correspondant au son complexe *ut*, et le *si* est un son isolé, juxtaposé. Aussi les trois notes *ut* — *mi* — *sol* ont-elles beaucoup de sûreté, se soutenant et se maintenant les unes les autres. En revanche, la septième isolée *si* doit être obtenue sans point d'appui contre la puissance supérieure des autres notes, ce à quoi le chanteur ou l'auditeur ne peut arriver, si l'intervalle mélodique qui y conduit n'est très-simple et facile à saisir. Aussi faut-il observer des règles particulières pour amener cette note, tandis que l'introduction de l'*ut*, qui trouve dans l'accord même son point d'appui, peut se faire tout à fait librement et sans obstacles. Cette distinction pratique à établir dans les lois de la disposition des parties, est exprimée par les musiciens au moyen de la qualification du *si* comme de la seule note dissonnante de l'accord. Quoique cette expression ne soit pas précisément très-heureusement choisie, nous l'emploierons dans la suite sans hésiter, après avoir expliqué ici quel en est le vrai sens.

Arrivons maintenant à déterminer, pour chacun des accords de

septième précédemment trouvés, le son complexe qu'ils représentent, et les notes complexes qu'ils renferment.

1° L'accord de septième de dominante, *sol — si — ré — fa*, contient trois notes appartenant au son complexe *sol*, savoir *sol*, *si* et *ré* tandis que la septième *fa* est la note dissonnante. Il faut remarquer, cependant, que cette septième mineure *sol — fa* se rapproche déjà suffisamment du rapport $\frac{7}{4}$, qui serait exprimé presque exactement par l'intervalle *sol — fa*, pour que la note *fa* puisse presque jouer le rôle du septième son partiel de *sol*. Ce son complexe serait plus exactement représenté par *sol — si — ré — fa*. Les chanteurs changent aussi très-facilement le *fa* de l'accord de septième de dominante en *fa*, soit qu'en général cette note descende sur le *mi*, soit que l'accord obtenu par cette modification ait plus de douceur. C'est ce qui arrivera facilement, surtout lorsque, dans l'accord précédent, le son du *fa* n'aura pas été fixé par une affinité énergique. Ainsi, par exemple, si à l'accord consonnant *sol — si — ré* on vient ajouter un *fa*, il se changera facilement en *fa* parce qu'aucun des sons *sol*, *si* ou *ré* n'est étroitement allié au *fa*. Aussi, quoique l'accord de septième de dominante soit dissonnant, sa dissonnance même est assez voisine d'un des sons partiels de la dominante, pour que l'accord, dans son ensemble, puisse être considéré comme représentant le son complexe de cette dominante. C'est précisément pour cela que la septième de cet accord est affranchie, dans sa marche, de beaucoup de restrictions auxquelles on soumet au contraire les autres septièmes dissonnantes. On admet notamment qu'elle arrive librement et sans préparation, ce qui n'est pas permis dans d'autres cas.

Aussi est-ce l'accord de septième de dominante qui, dans la musique moderne, joue le principal rôle après l'accord tonique. Il précise la tonalité, plus que le simple accord de dominante *sol — si — ré*, plus exactement que l'accord diminué *si — ré — fa*. Comme accord dissonnant, il tend à se résoudre sur l'accord de tonique, ce que ne fait pas le simple accord de dominante. A cela enfin, il faut encore ajouter que l'harmonie s'y trouve extraordinairement peu troublée, en sorte que c'est le plus doux des accords dissonnants. Aussi, dans la musique moderne, pourrions-nous à peine nous en passer. Il a été trouvé, à ce qu'il paraît, par Monteverde, au commencement du dix-septième siècle.

2° L'accord de septième majeure sur la seconde du ton, *ré — fa — la — ut*, contient trois des sons partiels du son complexe *fa*, savoir :

fa, $\underline{\textit{la}}$ et *ut*. Dans la gamme naturelle, le *ré* forme avec chacun d'eux une dissonnance et doit être considéré comme la note dissonnante de l'accord. La forme normale de cet accord est donc celle que Rameau a déjà considérée comme telle, et où le *fa* joue le rôle de son fondamental : *fa* — $\underline{\textit{la}}$ — *ut* — *ré*, c'est-à-dire l'accord de sixte et quinte, ou, suivant la dénomination de Rameau, l'accord de sixte majeure. C'est sous cette forme qu'il apparaît ordinairement dans la cadence d'*ut* majeur. Il a donc une signification, une relation avec la tonalité mieux définie que celle de l'accord mineur faux *ré* — *fa* — $\underline{\textit{la}}$, dont il a été déjà question, et que, dans l'exécution et l'audition, la voix et l'oreille changent en $\underline{\textit{ré}}$ — *fa* — $\underline{\textit{la}}$, tiré du ton de $\underline{\textit{ré}}$ mineur. En changeant *ré* — *fa* — $\underline{\textit{la}}$ en $\underline{\textit{ré}}$ — *fa* — $\underline{\textit{la}}$, nous arrivons à un accord consonnant; la tendance de ce côté sera très-forte, si, dans la marche de la mélodie, la parenté du *ré* avec le *sol* n'est pas très-énergiquement accusée. Si, au contraire, nous voulions changer le *ré* en $\underline{\textit{ré}}$ dans l'accord *ré* — *fa* — $\underline{\textit{la}}$ — *ut*, nous le rendrions bien ainsi consonnant avec le *fa* et le $\underline{\textit{la}}$, mais non avec l'*ut;* au contraire, $\underline{\textit{ré}}$ — *ut* est plus dissonnant que *ré* — *ut*, et ce ne serait jamais que le son partiel $\underline{\textit{la}}$ qui rentrerait dans le son complexe du $\underline{\textit{ré}}$, en sorte que, malgré ce changement, le *fa*, qui, considéré comme son complexe, réunit trois sons de l'accord, conserverait la prépondérance sur le $\underline{\textit{ré}}$ qui n'en réunit que deux. Conformément à ces inductions, je trouve, sur mon harmonium juste, que l'accord *fa* — $\underline{\textit{la}}$ — *ut* — *ré*, comme accord de sous-dominante d'*ut* majeur, fait mieux que *fa* — $\underline{\textit{la}}$ — *ut* — $\underline{\textit{ré}}$.

3° L'accord de septième correspondant sur la seconde, en mineur, *ré* — *fa* — $\overline{\textit{la}}\flat$ — *ut* ne contient que le son *ut* qui puisse être considéré comme partie intégrante des sons complexes *fa* ou $\overline{\textit{la}}\flat$. Mais comme cet *ut* est le troisième son partiel du *fa* et seulement le cinquième du $\overline{\textit{la}}\flat$, le *fa* a aussi, généralement, la prépondérance comme son fondamental et l'accord doit être considéré comme l'accord de sous-dominante *fa* — $\underline{\textit{la}\flat}$ — *ut*, avec addition de la note dissonnante *ré*. La tendance à changer le *ré* en $\underline{\textit{ré}}$ est encore moins prononcée ici que dans l'accord majeur correspondant.

4. L'*accord de septième sur la septième*, en majeur, $\underline{\textit{si}}$ — *ré* — *fa* — $\underline{\textit{la}}$ contient deux sons, $\underline{\textit{si}}$ et *ré*, qui appartiennent au son de la dominante *sol*, et deux autres, le *fa* et le $\underline{\textit{la}}$, qui appartiennent au son complexe *fa*. L'accord se partage donc en deux moitiés d'égale importance. Il faut remarquer, cependant, que les deux sons *fa* et $\underline{\textit{la}}$ se

rapprochent de très-près des deux sons partiels du *sol*, les plus voisins l'un de l'autre. On peut écrire, en effet, les sons partiels du *sol*, à partir du quatrième, de la manière suivante :

sol —	*si* —	*ré* —	*fa* —	*sol* —	*la*
4	5	6	7	8	9

Donc, en réalité, l'accord de neuvième *sol* — *si* — *ré* — *fa* — *la* peut représenter le son de la dominante, pourvu qu'on maintienne nettement l'analogie par la disposition des sons ; le *sol* doit être la note la plus grave, et le *la* la plus aiguë ; il sera bien aussi de ne pas mettre le *fa* trop bas. Comme le *la* qui est le neuvième son partiel du *sol*, lequel est très-faible dans tous les timbres usuels, fait souvent défaut, et qu'en outre, la différence d'un comma subsiste aussi bien entre le *fa* et le *fa*, qu'entre le *la* et le *la*, il faut exactement de même rendre l'analogie de l'accord de neuvième avec le son complexe *sol* aussi grande que possible. L'écart entre le *fa* et le *fa*, le *la* et le *la*, ne devient pas alors très-frappant. Dans ce cas il faut considérer le *fa* et le *la* comme les notes dissonnantes de l'accord de neuvième *sol* — *si* — *ré* — *fa* — *la*, parce qu'ils sont très-voisins des éléments du *sol*, sans pourtant se confondre exactement avec eux. L'introduction libre du *la* est donc permise par la même raison que celle du *fa* dans l'accord de septième de dominante *sol* — *si* — *ré* — *fa*. Enfin on peut supprimer une note de l'accord de neuvième, pour lui donner quatre parties, par exemple, la quinte ou le son fondamental :

sol — *si* — *fa* — *la* ou *si* — *ré* — *fa* — *la*.

Pourvu que l'ordre des sons partiels soit respecté autant que possible, c'est-à-dire que le *la* soit en haut, l'accord pourra toujours être reconnu comme le son complexe *sol*, et en tenir lieu.

C'est là tout simplement, à ce qu'il me semble, la raison pour laquelle les musiciens trouvent mieux de placer en haut le *la* de l'accord *si* — *ré* — *fa* — *la*. Hauptmann fait même de cela une règle absolue, et il la justifie d'une manière assez artificielle. De cette manière, l'ambiguïté de cet accord disparaît autant que possible, et il acquiert une relation facile à comprendre avec la dominante d'*ut* majeur ; dans les autres renversements, au contraire, l'accord sera près de se changer en l'accord de sous-dominante en *la* mineur. Au reste, dans la gamme naturelle, l'accord formé des sons partiels du *sol*,

sol — si — ré — fa — la, est très-doux et peu dissonnant; l'accord de neuvième en *ut* majeur, *sol — si — ré — fa — la* et le renversement *si — ré — fa — la*, sont un peu plus durs à cause de la tierce pythagoricienne *ré — fa* et de la quinte fausse *fa — si*, mais pas encore beaucoup. Ils deviennent au contraire très-durs, si on met le *la* en bas.

Lorsqu'après l'accord de septième *si — ré — fa — la* vient l'accord parfait *ut — mi — sol*, toutes les notes de la gamme d'*ut* majeur sont, comme on l'a dit plus haut, passées en revue, en sorte que cette combinaison détermine la tonalité très-vite et d'une manière complète.

5° L'*accord de septième diminuée*, *si — ré — fa — la*♭, partage cette dernière propriété avec l'accord correspondant majeur; à cause de cela et de la grande facilité avec laquelle il se prête à des modifications, il est très-employé dans la musique moderne, souvent même peut-être avec exagération, pour moduler. Il ne renferme aucune note qui puisse se rapporter au son complexe d'une autre note comprise dans l'accord, mais on peut bien considérer les trois sons *si — ré — fa* comme appartenant au son complexe de la dominante *sol;* aussi, se présente-t-il également comme accord de neuvième, sous la forme :

sol — si — ré — fa — la♭.

Il représente donc imparfaitement le son de la dominante avec addition d'un son étranger *la*♭; on peut considérer le *fa* et le *la*♭ comme les notes dissonnantes de l'accord. Mais la dépendance mutuelle des trois sons *si — ré — fa* dans le son complexe *sol*, n'est pas assez fortement accusée pour que les sons *fa* et *la*♭ soient, dans le mouvement mélodique, nettement subordonnés au *si* et au *ré*. On les laisse, au moins, s'introduire librement, et on résout l'accord en déplaçant toutes ses notes de la plus petite quantité possible, parce qu'il n'a pas, par lui-même, une cohésion suffisante pour permettre des mouvements considérables.

6° Les *accords de septième avec septième majeure* dans le système direct du ton, *fa — la — ut — mi* et *ut — mi — sol — si* en *ut* majeur, *la*♭ *— ut — mi*♭ *— sol* en *ut* mineur, représentent surtout, comme on l'a déjà remarqué précédemment, un accord parfait avec la septième majeure comme note dissonnante. Cette septième majeure forme une dissonnance assez dure, et tranche très-nettement sur

le son complexe, dans lequel elle ne rentre manifestement pas.

7° Les *accords de septième avec septième mineure*, dans le système direct, *la — ut — mi — sol* et *mi — sol — si — ré*, font ressortir surtout le son de leur tierce, à laquelle le son fondamental semble comme ajouté. Ainsi *ut — mi — sol — la* est le son complexe *ut*, avec addition du *la*, *sol — si — ré — mi* le son complexe *sol* avec l'addition du *mi*. Mais comme *ut — mi — sol* et *sol — si — ré* sont les accords du ton qui reviennent le plus souvent, l'addition du *la* ou du *mi* dans ces accords de septième produit, par le contraste, une impression relativement très-énergique. En outre, les sons fondamentaux de ces accords de septième ne sont pas aussi isolés que dans l'accord *ré — fa — la — ut*, qui n'a pas une seule quinte juste. Dans *la — ut — mi — sol*, la quinte *mi* et même la septième *sol* appartiennent au son complexe de la dissonnance *la*; de même on peut, dans l'accord *mi — sol — si — ré*, rapporter le *si* et le *ré* au son complexe *mi*. Par conséquent, les sons ajoutés, *la* ou *mi*, ne sont pas nécessairement soumis aux lois du mouvement mélodique des dissonnances. Ordinairement, les harmonistes considèrent toujours comme forme normale de ces accords, la forme d'accord de septième, dont ils regardent le son fondamental comme le son principal de l'accord. Il serait peut-être plus naturel de considérer *ut — mi — sol — la* comme la forme normale de *la — ut — mi — sol* et l'*ut* comme son fondamental. Mais, ce dernier accord est le son complexe d'*ut* avec tendance au *la*, et, dans les modulations, cette immixtion du son complexe *la* sert à arriver aux alliés du *la*, qui n'ont point d'affinité pour l'accord *ut — mi — sol*, savoir *ré — fa — la*. De même, on peut passer de *sol — si — ré — mi* à *la — ut — mi*; de *sol — si — ré*, ce serait toujours un saut brusque. Par conséquent, pour les modulations, le *la* et le *mi* sont les éléments essentiels, et, à ce point de vue pratique, on peut leur laisser le nom de sons fondamentaux des accords considérés.

8° L'accord de septième sur la tonique, en mineur, *ut — mi*♭ *— sol — si* est rarement employé parce que, dans le mode mineur, le *si* appartient essentiellement au mouvement ascendant, tandis que, dans la résolution régulière, la septième doit descendre. Il serait donc toujours préférable de donner à l'accord la forme *ut — mi*♭ *— sol — si*♭ qui est analogue à l'accord désigné par le n° 7.

CHAPITRE XVIII

LOIS DU MOUVEMENT MÉLODIQUE DES PARTIES.

Nous nous sommes, jusqu'ici, toujours bornés à considérer les relations des notes d'un morceau avec la tonique, et celles des accords avec l'accord de tonique. C'est sur ces relations que repose l'agencement des sons en un tout bien coordonné. Mais il est nécessaire, en outre, d'établir un lien naturel entre les sons ou les accords qui se suivent immédiatement. Par là, le lien artistique de la masse des sons devient encore plus intime, et, en général, il faudra toujours viser à établir une liaison de cette nature, quoique, par exception, certaines exigences particulières de l'expression puissent réclamer un mouvement plus vif, moins dépendant de ce qui précède. Nous avons déjà vu, dans l'histoire des gammes, que le sentiment des liaisons mutuelles des sons ne reposait pas, vraisemblablement du moins, à l'origine, sur leur affinité commune avec la tonique ; il y avait plutôt d'abord, au lieu d'une coordination de ce genre, seulement le lien établi par l'enchaînement d'une série de quintes ; tout au moins, c'est celui-là seulement qui s'est assez développé pour prendre place dans les spéculations théoriques sur la structure du système musical, et pour s'imposer à l'oreille sous sa véritable nature. Mais, à côté du sentiment très-développé de la tonique, tel qu'il domine dans la musique harmonique moderne, la nécessité d'établir, entre les sons et les accords isolés, une liaison, un enchaînement, n'a point disparu, quoique la série des quintes qui, originairement, rattachait toutes les notes du ton, comme par exemple :

fa — ut — sol — ré — la — mi — si,

ait été interrompu par l'introduction de la tierce naturelle, puisque nous avons maintenant :

ut — ut — sol — ré | *la — mi — si.*

Le *lien musical entre deux notes consécutives* peut être déterminé :

1° Par l'*affinité des sons*. Celle-ci est *directe*, lorsque les deux sons consécutifs forment un intervalle consonnant; dans ce cas, en effet, comme nous l'avons vu précédemment, il y a toujours un des sons partiels nettement perceptibles de la première note qui coïncide avec un autre de même nature de la seconde. Par là, la hauteur du son qui suit est déterminée d'une manière précise pour le sentiment musical. La plus grande affinité de ce genre se rencontre dans le saut d'une note à son octave; mais, mélodiquement, il ne peut être employé qu'à la basse d'une manière fréquente; les parties supérieures en font rarement usage, parce que le changement dans la hauteur est trop considérable. Viennent ensuite les progressions par quinte et par quarte qui toutes deux sont encore très-bien déterminées, très-claires; puis les intervalles de sixte et de tierce majeures qui sont encore d'une exécution facile et sûre, tandis que le mouvement par sixte ou par tierce mineures commence déjà à présenter quelque chose d'incertain. Il faut remarquer, au point de vue esthétique, que la progression par tierces et sixtes majeures représente, je dirai presque, le plus haut degré de la beauté dans toute sa plénitude, ce qui tient peut-être à ce qu'on atteint là les limites des intervalles nettement intelligibles. Le mouvement par quintes et par quartes est trop clair, et, en quelque sorte, trop sage, trop sec; le mouvement par tierces mineures, et surtout par sixtes mineures, commence à être incertain. Les tierces et les sixtes majeures tiennent le juste milieu entre la lumière et l'ombre. Dans l'harmonie également, ces deux intervalles paraissent se comporter de même par rapport aux autres consonnances. — L'affinité entre deux sons consécutifs peut aussi être *indirecte* et seulement du second degré. C'est ce qui se présente, lorsque, dans la gamme, on procède par tons et demi-tons, comme par exemple :

ut — ré,	*ré — mi,*	*mi — fa*
sol	*sol*	*ut*

Le ton majeur *ut — ré* va de la quarte à la quinte du son sous-entendu *sol*, que Rameau supposait ajouté par la pensée, comme basse fondamentale de la progression mélodique dont il s'agit. Le ton mineur *ré — mi* va de la quinte à la sixte majeure du son auxiliaire *sol*, le demi-ton *mi — fa* de la tierce majeure à la quarte de la note auxiliaire *ut*. Mais, pour que la note auxiliaire, servant de point d'appui, puisse être facilement à la disposition du chanteur ou de l'auditeur, il faut que ce soit un des sons principaux du ton. Ainsi, la progression *la — si*, en *ut* majeur, est moins aisée pour les chanteurs, quoiqu'il s'agisse d'un ton majeur qui

peut être facilement exécuté avec le secours du *mi* comme note auxiliaire. Mais, le son du *mi* n'est pas aussi bien fixé, aussi préparé en quelque sorte dans la mémoire que celui de l'*ut* et de ses quintes *sol* et *fa*. Aussi l'hexachorde de Guy d'Arezzo, qui fut la gamme normale des chanteurs pendant tout le moyen âge, s'arrêtait-il à la sixte (1).

Cet hexachorde était chanté, en prenant pour point de départ des sons différents, mais formait toujours la même mélodie :

	sol	*la*	*si*	*ut*	*ré*	*mi*
ou	*ut*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*
ou	*fa*	*sol*	*la*	*si*♭	*ut*	*ré*.

L'intervalle du troisième au quatrième degré en est toujours le demi-ton.

C'est précisément pour cela que Rameau proposait, dans le mode mineur, d'exécuter l'intervalle *ré* — *mi*♭ et *mi*♭ — *fa* en s'appuyant plutôt sur le *sol* et l'*ut* que sur le *si*♭, septième de la gamme descendante, qui n'a point une affinité suffisante avec la tonique, et, par conséquent, n'est pas assez déterminée dans l'esprit du chanteur, pour pouvoir servir de point d'appui. Si on prend pour auxiliaire de l'intervalle *ré* — *mi*♭ le *sol* aigu le plus voisin, la progression a lieu de la quarte inférieure à la tierce majeure inférieure, et *mi*♭ — *fa* est le passage de la sixte majeure inférieure à la quinte inférieure. Par contre, la progression *la*♭ — *si*, en mineur, ne peut se ramener d'aucune façon à une affinité du second degré. Aussi est-elle nettement antimélodique, et devait-elle être absolument proscrite de l'ancienne musique homophone, exactement comme les intervalles de fausse quinte et de fausse quarte, par exemple, *si* — *fa* et *fa* — *si*. De là, les modifications déjà énumérées des gammes mineures ascendantes et descendantes.

Dans la musique harmonique moderne, beaucoup de ces difficultés ont disparu ou sont devenues moins sensibles, parce qu'une harmonie bien faite peut établir entre les sons ces liaisons qui manquent à la voix seule dans le mouvement mélodique. Aussi est-il beaucoup plus facile de chanter une partie qu'on ne connaît pas, dans un morceau à plusieurs parties, avec un accompagnement de piano qui donne

(1) D'Alembert explique de la même manière la délimitation de l'ancien heptachorde grec, formé de la réunion de deux tétrachordes :

si — *ut* — *ré* — *mi* — *fa* — *sol* — *la*,

où ne figure pas l'intervalle *la* — *si*. Mais l'explication ne pourrait s'appliquer qu'à un ton ayant pour tonique *ut*, ce qui n'était pas le cas des anciennes gammes grecques.

l'harmonie, qu'une phrase écrite pour la voix seule. Dans le premier cas, on apprécie la relation du son chanté avec toute l'harmonie ; dans le second, le rapport ne s'établit qu'entre les sons les plus rapprochés dans une même partie.

2° Les notes peuvent se relier musicalement, par le *peu de différence de leur hauteur*. Nous avons déjà mentionné ce fait à propos de la sensible. Il en est de même pour les sons complémentaires dans les passages chromatiques ; si, par exemple, en *ut* majeur, au lieu de *ut* — *ré* nous chantons *ut* — *ut*♯ — *ré*, l'*ut*♯ n'a, avec la tonique, aucune affinité du premier ou du second degré ; il n'a aucune signification, soit comme harmonie, soit comme modulation. Ce n'est qu'un degré de plus intercalé entre les deux sons, qui n'appartient pas à la gamme, et ne sert qu'à rapprocher le mouvement discontinu de la gamme, du mouvement continu du langage naturel, de la voix qui pleure ou qui hurle. Dans leur système enharmonique où ils partageaient le demi-ton en deux, les Grecs avaient poussé cette division encore plus loin que nous. Et pourtant une progression chromatique par demi-tons, malgré le caractère étranger du son qu'il faut atteindre, se fait avec assez de sûreté pour être employée même dans les modulations, dans le but d'arriver brusquement aux tonalités tout à fait éloignées.

Mais, les progressions par tons entiers, exécutées dans la gamme diatonique, peuvent, de la même manière, jouer le rôle de transitions entre deux sons qui sont dans l'accord. C'est ce qu'on appelle les *notes de passage*. Si, par exemple, une partie exécute le passage

ut — *ré* — *mi* — *fa* — *sol*

pendant que les autres tiennent l'accord d'*ut* majeur, les sons *ré* et *fa* ne sont pas dans cet accord, ils n'ont aucune relation harmonique, et ne trouvent leur justification que dans le mouvement mélodique de la partie isolée. En général, on fait coïncider ces notes de passage avec les temps faibles de la mesure, et on leur donne une courte durée. Dans l'exemple précédent, on placerait donc l'*ut*, le *mi*, le *sol* sur les temps forts. Le *ré* forme le passage entre *ut* et *mi*, *fa* entre *mi* et *sol*. Mais il est essentiel pour justifier leur présence que le passage ne se fasse que par tons ou demi-tons. Ils donnent alors un mouvement facile, se propageant sans résistance, et dans lequel on cesse presque d'apprécier les notes dissonnantes non accentuées.

C'est aussi dans les accords *essentiellement dissonnants* qu'il faut, conformément à la règle, conserver à la note dissonnante qui se trouve isolée au milieu des autres, une marche mélodique aussi facile à com-

prendre et à exécuter que possible. Et comme le sentiment de l'affinité naturelle d'un son ainsi isolé, se trouve, pour ainsi dire, étouffé sous les autres sons, qui se produisent en même temps et s'imposent beaucoup plus énergiquement à la perception, il ne reste aux chanteurs et aux auditeurs que la progression diatonique, pour déterminer la hauteur et la relation mélodique de la note dissonnante. Aussi, d'après la règle, doit-on demander que la note dissonnante apparaisse et disparaisse en procédant par ton ou demi-ton. Les accords qu'il faut considérer comme essentiellement dissonnants, sont ceux où les notes dissonnantes ne sont pas seulement des sons transitoires accidentellement superposés à un accord qui se prolonge, mais où elles sont, soit accompagnées d'un accord particulier, nettement distinct du précédent et du suivant, soit accusées par leur durée ou leur accentuation, de manière à ne pouvoir échapper à l'attention de l'auditeur. On a déjà remarqué plus haut que ces accords dissonnants ne peuvent être employés pour eux-mêmes, mais principalement comme un moyen d'exalter le sentiment et le désir de la marche rapide de la phrase. Il en résulte, pour le mouvement de la note dissonnante, que, si elle entre dans l'accord pour en sortir ensuite, elle doit monter ou descendre les deux fois qu'elle fait son apparition. Si on la laissait, au contraire, prendre un mouvement inverse dans l'accord dissonnant, la dissonnance ne paraîtrait pas motivée. Il serait alors préférable de laisser la note considérée dans la position où elle forme consonnance, et de ne pas l'en déplacer. Entrer en dissonnance et revenir aussitôt au point de départ, ce serait, pour une note, un mouvement sans but, exécuté comme par erreur.

En second lieu on peut poser comme règle, que le mouvement de la note dissonnante ne peut être dirigé de manière à faire disparaître la dissonnance, les autres parties de l'accord restant dans la même position. Car, une dissonnance qui disparaîtrait d'elle-même, qu'on s'attend à voir cesser au pas suivant en quelque sorte, ne peut donner aucune impulsion à la marche de l'harmonie. Aussi l'effet en est-il terne et peu justifié. C'est là surtout ce qui fait que les accords de septième, quand ils doivent se résoudre par le mouvement de la septième, n'admettent pour cette note que le mouvement descendant. En effet, la septième montant dans la gamme, deviendrait l'octave du son fondamental, et la dissonnance disparaîtrait de l'accord. On trouve dans Bach, Mozart et autres, des mouvements de ce genre dans l'accord de septième de dominante; mais alors la septième n'est qu'une note de passage et doit être traitée comme telle. Dans ce cas, elle n'agit pas sur la marche de l'harmonie.

La hauteur de la note dissonnante se trouve déterminée avec le plus

de sûreté dans un accord à plusieurs parties, lorsque cette note a déjà figuré comme consonnance dans l'accord précédent, et a été simplement maintenue dans le nouveau. Si, par exemple, on fait suivre les accords :

sol — *ré* — *sol* — *si*
ut — *mi* — *sol* — *si*,

le *si* a été déterminé dans le premier accord par sa consonnance avec le *sol ;* il ne fait que rester, pendant l'introduction de l'*ut* et du *mi* qui font de l'accord un accord de septième dissonnant *ut* — *mi* — *sol* — *si*. On dit qu'une dissonnance de ce genre est *préparée*. Jusqu'à la fin du seizième siècle, c'était le seul moyen autorisé, d'introduire les dissonnances. Ainsi préparées, elles ont une action particulièrement énergique ; une portion de l'accord précédent hésite à s'en aller, et doit être violemment arrachée de sa place par l'accord qui suit. On exprime ainsi, d'une manière très-saisissante, la tendance à la marche malgré des résistances qui ne cèdent qu'à regret. Mais, précisément à cause de cela, il faut faire venir le nouvel accord (*ut* — *mi* — *sol* dans notre exemple) sur un temps énergiquement accentué ; autrement il lui manque l'expression de la violence dans l'effort. En revanche, la résolution de la dissonnance préparée se fait naturellement sur un temps faible. Il n'y a généralement rien de plus mauvais que des dissonnances jouées ou chantées avec hésitation, d'une manière peu sûre, car ce sont alors simplement des combinaisons désagréables à l'oreille. Elles ne peuvent régulièrement se justifier que par l'expression de l'énergie, d'une forte impulsion en avant.

Des dissonnances ainsi préparées, auxquelles on donne le nom de *retards*, se présentent non-seulement dans les accords de septième, mais aussi dans beaucoup d'autres, par exemple :

Préparation :	*sol* — *ut* — *mi*
Retard :	*sol* — *ut* — *ré*
Résolution :	*sol* — *si* — *ré*.

L'*ut* est ici la dissonnance préparée dans le second accord qui doit tomber sur un temps fort ; puis vient le *ré*, quinte du *sol* qui produit la dissonnance *ut* — *ré;* enfin l'*ut* doit disparaître en s'éloignant du *ré*, d'après la seconde loi posée plus haut, ce qui donne la résolution *sol* — *si* — *ré*. On peut disposer les accords dans l'ordre inverse, de manière à faire du *ré* la dissonnance préparée qui doit être chassée par l'*ut*. Mais c'est moins bon, parce que le mouvement descendant convient généralement mieux que le mouvement ascendant, au son

qui doit être chassé. Une hauteur croissante nous donne toujours involontairement l'impression d'un effort plus grand, parce que nous devons faire un plus grand effort avec la voix pour donner les sons aigus. Pour la note dissonnante qui doit céder à une puissance supérieure, il vaut mieux qu'elle descende que de s'élever en quelque sorte par sa puissance propre. Cependant, ce dernier mouvement peut convenir à certaines circonstances, et il y en a un assez grand nombre d'exemples.

Dans un autre cas, quand la dissonnance n'est pas préparée, mais qu'elle apparaît en même temps que l'accord où elle joue ce rôle, ce qui arrive surtout et souvent pour les accords de septième, la dissonnance a une autre signification. Comme les septièmes qui s'introduisent librement dans l'harmonie, doivent, régulièrement, faire leur entrée en descendant, on peut toujours la considérer comme descendant de l'octave du son fondamental de son accord, en supposant un accord majeur ou mineur consonnant, de même base, intercalé entre l'accord de septième et l'accord précédent. Dans ce cas, par conséquent, l'entrée de la septième ne fait qu'indiquer que cet accord dissonnant va se décomposer, et que l'harmonie se dirige par le mouvement mélodique vers un nouveau but. Ce dernier, l'accord de résolution, doit être accentué; aussi, l'entrée de la dissonnance coïncide-t-elle nécessairement avec le temps faible qui précède.

C'est que l'entrée d'une note dissonnante, ordinairement isolée, opposée à un accord à plusieurs parties, ne peut servir à exprimer l'énergie dans l'effort; pour remplir ce but, il faut, au contraire, faire entrer un accord qu'on oppose à une note isolée, pourvu que celle-ci n'ait pas une intensité prépondérante. Aussi est-il dans la nature des choses que, dans le premier cas, l'entrée se fasse sur un temps faible, et, dans le second, sur un temps fort.

On peut souvent s'écarter de ces règles sur l'entrée des dissonnances, pour les accords de septième du système indirect où se trouvent la quarte et la seconde du ton, et où les sons voisins de la dominante inférieure sont entremêlés avec ceux voisins de la dominante supérieure. Ces accords peuvent encore être employés à autre chose qu'à renforcer l'impression dynamique du mouvement de l'harmonie. Ils ont aussi pour objet de conserver ou de renforcer le sentiment de la tonalité, en présentant à l'auditeur l'ensemble des notes caractéristiques du ton ; leur existence se justifie par cet objet.

Quelques-unes des parties de l'accord de tonique *ut,* peuvent très-bien passer aux sons voisins de la dominante supérieure *sol* — $\underline{si}$ — $\overline{\text{ré}}$, d'autres à ceux de la dominante inférieure *fa* — $\underline{la}$ — *ut* ou *fa* — $\overline{la}\flat$

— *ut;* et chacune d'elles, s'appuyant sur le sentiment d'une affinité voisine, pourra trouver, avec une parfaite sûreté, la position du son nouveau.

Une fois l'accord dissonnant arrivé, cependant, les notes dissonnantes, dont les affinités naturelles éloignées seront masquées par l'accord étranger résonnant simultanément avec elles, devront procéder suivant la règle de résolution des dissonnances. Un chanteur, par exemple, qui chante le *fa* dans l'accord *sol* — *si* — *ré* — *fa*, chercherait vainement à s'imaginer le son du *la* allié au *fa*, de manière à en obtenir la hauteur précise après un saut brusque d'un grand intervalle ; mais il peut bien franchir avec sûreté le petit intervalle de demi-ton qui le sépare du *mi* dans l'accord *sol* — *ut* — *mi*. En revanche, le *sol*, dont le son complexe se trouve à peu près représenté par l'accord de septième, peut très-bien être immédiatement remplacé par un de ses alliés, l'*ut*, par exemple, ou le *si*.

Dans les accords *si* — *ré* | *fa* — *la* et *si* — *ré* | *fa* — *la*♭, qui ne penchent ni du côté de la dominante ni du côté de la sous-dominante, il ne sera généralement pas bon de faire parcourir de grands intervalles à l'un des sons.

Il ne sera pas bon, non plus, de franchir de grands intervalles en passant d'un autre accord que l'accord de tonique, aux accords du système indirect, parce que l'accord de tonique seul est allié à la fois aux accords de dominante et de sous-dominante. — Pour les accords de septième du système direct, il n'est pas possible d'y arriver par un autre accord allié à la fois aux deux portions extrêmes de l'accord de septième ; aussi, dans ce cas, l'entrée de la dissonnance doit-elle être strictement soumise à la règle générale.

Les musiciens sont divisés sur la manière d'envisager l'accord de sous-dominante avec addition de sixte, c'est-à-dire *fa* — *la* — *ut* — *ré* en *ut* majeur. Ce qu'il y a de plus exact, c'est de considérer, comme l'a proposé Rameau, le *ré* comme une note dissonnante qui doit se résoudre en montant vers le *mi*. C'est là aussi, sans aucun doute, la résolution la plus harmonieuse. Les théoriciens modernes, au contraire, voient dans cet accord l'accord de septième de *ré*, et considèrent l'*ut* comme une dissonnance qui doit se résoudre en descendant, pendant que le *ré* pourrait se mouvoir avec une entière liberté, et notamment descendre, si l'*ut* reste en place.

SUITES D'ACCORDS.

De même que l'ancienne musique homophone réclamait, entre les sons d'une mélodie, une affinité enchaînant les notes consécutives, de même aussi la musique moderne tend à établir un enchaînement entre les accords d'un tissu harmonique, tandis qu'elle laisse une beaucoup plus grande liberté au mouvement mélodique des notes isolées, parce que l'harmonie accuse, d'une manière beaucoup plus nette, beaucoup plus tranchée que dans la mélodie homophone, les affinités naturelles des sons. Le sentiment de l'enchaînement des accords par voie d'affinité était encore peu développé au seizième siècle. Chez les grands maîtres italiens de ce temps, les accords du ton se succèdent souvent par brusques transitions, que nous n'admettrions qu'exceptionnellement aujourd'hui. Pendant le dix-septième siècle, au contraire, le sentiment des propriétés harmoniques se développa suffisamment pour qu'au début du siècle suivant, nous trouvions les règles qui s'y rapportent déjà déterminées par Rameau. En s'appuyant sur la définition qu'il avait donnée de la basse fondamentale, Rameau énonça cette règle : « *Régulièrement, la basse fondamentale ne peut procéder, en montant ou en descendant, que par quintes justes ou par tierces.* D'après ce que nous avons dit, la basse fondamentale d'un accord est le son complexe qui se trouve représenté, soit seul, soit mélangé d'autres éléments, par les sons d'un accord. Prise dans ce sens, la règle de Rameau concorde avec celle de la progression mélodique d'une note isolée vers ses alliés les plus rapprochés. Comme une partie mélodique, l'*accord-son* ne peut aller que vers ses alliés les plus voisins. Seulement, la progression par voie d'affinité du second degré est beaucoup plus difficile à justifier pour les accords que pour les sons isolés, de même que la progression par demi-tons, à la manière de la sensible. Aussi la règle de Rameau, pour la progression de la basse fondamentale, doit-elle être, en somme, beaucoup plus strictement observée que celles relatives à une des autres parties prise isolément. — Prenons, par exemple, l'accord *ut* — $\underline{\textit{mi}}$ — *sol*, qui correspond au son complexe *ut ;* nous pouvons passer de là, par quintes, au son complexe *sol*, *sol* — $\underline{\textit{si}}$ — *ré*, ou au son complexe *fa*, *fa* — $\underline{\textit{la}}$ — *ut*. Ces deux derniers accords ont, en effet, chacun, une note commune, savoir le *sol* et l'*ut* avec l'accord *ut* — $\underline{\textit{mi}}$ — *sol*, et lui sont, par conséquent, directement alliés.

Mais nous pouvons aussi faire mouvoir par tierces le son complexe ; nous obtenons alors des accords mineurs, si nous ne voulons pas

abandonner le ton. Le passage de l'*ut* au *mi* sera exprimé par la suite d'accords *ut* — *mi* — *sol* et *mi* — *sol* — *si*, où l'affinité est déterminée par deux notes communes. Il en est de même de la suite *ut* — *mi* — *sol*, et *la* — *ut* — *mi*, de l'*ut* au *la*. Cette dernière est même encore plus naturelle que la première, parce que l'accord *la* — *ut* — *mi* représente le son *la* altéré avec addition de l'*ut;* le son *ut* se trouve donc dans les deux accords, dans l'un comme son complexe, dans l'autre comme note isolée. C'est ce qui ne se présente pas dans le premier cas.

Si nous voulons abandonner le ton d'*ut* majeur, nous pouvons aussi procéder par tierces majeures, et, par conséquent, passer de *ut* — *mi* — *sol* à *mi* — *sol*♯ — *si* ou à *la* — *ut*♯ — *mi*, comme cela est très-usité dans les modulations.

Pour les accords consonnants, Rameau n'admet une simple progression diatonique de la basse fondamentale que dans le cas où on va d'un accord majeur à un accord mineur, par exemple, de *sol* — *si* — *ré* à *la* — *ut* — *mi*, c'est-à-dire du son complexe *sol* au son complexe *la;* il dit que c'est une licence. En réalité, dans notre manière d'envisager les choses, cette marche s'explique facilement, si nous considérons l'accord mineur *la* — *ut* — *mi*, comme le son complexe *ut* avec addition d'un *la*. Il y a alors passage, par voie d'étroite affinité du *sol* à l'*ut*, et le *la* n'apparaît que comme une dépendance de ce dernier. Tout accord mineur représente imparfaitement un double son complexe, et peut, par conséquent, aussi recevoir une double acception. Rameau a formulé systématiquement ce *double emploi* d'abord pour l'accord mineur avec addition de septième, qui peut représenter le *ré* sous la forme *ré* — *fa* — *la* — *ut*, et le *fa* sous la forme *fa* — *la* — *ut* — *ré*, ou, pour employer l'expression de Rameau, dont la basse fondamentale peut être *ré* ou *fa*. Dans l'accord de septième, la double signification est plus accusée, parce que le son complexe *fa* y est plus complet; mais elle existe aussi, quoique moins nettement, dans l'accord mineur simple.

A la cadence rompue (en allemand *trompeuse*)

sol — *si* — *ré*...... *la* — *ut* — *mi*,

correspond, en mineur, la combinaison

sol — *si* — *ré*...... *la*♭ — *ut* — *mi*♭,

où l'accord $\overline{la}\flat$—*ut* — $\overline{mi}\flat$ remplace la résolution normale *ut* — $\overline{mi}\flat$ — *sol*. Ici, cependant, il ne reste du son complexe *ut* qu'une seule note, aussi le sentiment de surprise y est-il beaucoup plus frappant. On l'adoucit beaucoup en ajoutant à l'accord de *sol* la septième *fa*, alliée au $\overline{la}\flat$.

Quand deux accords, alliés seulement au second degré, se succéderont immédiatement, cela fera, en général, l'effet d'un saut brusque. Mais si l'accord qui leur sert de trait d'union est un des principaux du ton, et, par suite, a déjà souvent frappé l'oreille, l'effet n'est pas aussi marqué. Aussi, dans les cadences finales, n'est-il pas rare du tout de voir se suivre les accords *fa* — $\underline{la}$ — *ut* et *sol* — $\underline{si}$ — *ré*, qui sont alliés par l'intermédiaire de l'accord tonique :

fa — $\underline{la}$ — *ut* *sol* — $\underline{si}$ — *ré*
ut — $\underline{mi}$ — *sol*

En général, pour toutes ces règles sur la marche mélodique des parties, il faut bien admettre qu'elles comportent de nombreuses exceptions, soit que l'expression exige exceptionnellement des écarts plus grands dans la progression, soit que la mémoire des accords entendus peu auparavant, puisse rendre nettement sensible une affinité même faible. Il est évident que les harmonistes se plaçaient à un faux point de vue, lorsqu'ils disaient que telle ou telle chose est absolument proscrite en musique. En réalité, en musique, il n'y a rien d'absolument défendu, et on trouve des dérogations à toutes les règles du mouvement mélodique, précisément dans les phrases des plus grands compositeurs qui produisent le plus d'effet. On aurait dû plutôt se borner à dire que telle ou telle marche prohibée produit, sur l'oreille, un effet saisissant et inattendu, qui, précisément pour cela, ne convient que pour exprimer l'*inattendu*. En général, les préceptes des théoriciens conduisent à une mélodie et à une harmonie faciles, coulantes, bien coordonnées. Si c'est là le but qu'on veut atteindre, on fait bien d'éviter ce qu'ils défendent. Mais on ne peut nier, que, par une proscription trop rigoureuse de l'étrange, on ne coure risque de tomber dans la trivialité et la platitude, tandis que, d'un autre côté, par l'infraction non motivée et trop fréquente des règles, les phrases deviennent baroques et décousues.

Dans la succession de deux accords qui ne se rattachent pas l'un à l'autre, leur transformation en accords de septième est souvent avantageuse, pour déterminer un meilleur enchaînement.

Ainsi à la succession précédente des accords indirectement alliés :

fa — la — ut et *sol — si — ré,*

on peut substituer celle des accords de septième qui représentent les mêmes sons complexes :

fa — la — ut — ré et *sol — si — ré — fa.*

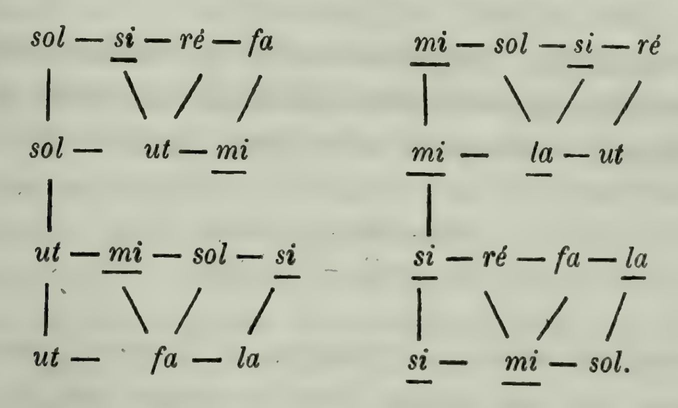
Deux des quatre notes restent alors invariables. Dans l'accord de *fa*, c'est le *ré* qui est du côté de la dominante ; dans l'accord de *sol*, c'est le *fa*.

De cette manière, les accords de septième jouent un rôle important dans la musique moderne ; ils rendent possible aux accords une marche logique et cependant rapide, dont la force d'impulsion est encore augmentée par l'effet de la dissonnance. Ils permettent notamment d'exécuter sans difficulté des mouvements à la sous-dominante. Ainsi nous pouvons, par exemple, en partant de l'accord *sol —si — ré*, passer non-seulement à l'accord *ut — mi — sol,* mais encore, en prenant le *sol* comme septième, arriver immédiatement à l'accord de septième *la — ut — mi — sol*, qui réunit les deux accords *ut — mi — sol* et *la — ut — mi*, puis passer ensuite à l'accord *ré — fa — la*, allié du dernier, en sorte qu'en deux pas, nous sommes arrivés aux limites extrêmes du ton d'*ut* majeur. Cette progression donne en même temps le meilleur mouvement possible à la septième, puisque cette note, déjà entendue dans l'accord précédent (le *sol* de l'exemple), n'arrive qu'après avoir été préparée, et peut se résoudre en descendant (sur le *fa*). Si nous voulions exécuter ce mouvement en sens inverse, nous devrions faire partir la septième du *la* de l'accord *ré — fa — la*, mais alors nous serions forcés d'introduire brusquement l'*ut* de l'accord de septième, parce qu'en le faisant descendre du *ré* nous aurions deux quintes de suite (*ré — la* et *ut — sol*), ce qui est défendu. Nous devrions plutôt le faire partir brusquement du *fa*, parce que le *la* du premier accord doit déjà donner le *la* et le *sol* de l'accord de septième. Nous n'avons donc point une progression facile et naturelle du côté de la dominante supérieure ; le mouvement rencontre beaucoup plus d'obstacles que du côté de la sous-dominante. D'après cela, la progression régulière et ordinaire des accords de septième, est celle où leur son fondamental devient la quinte de l'accord suivant. En désignant cette note par I, la tierce au-dessus par III, etc., nous pouvons arriver aux accords suivants par septième descendante :

I — III — V — VII et I — III — V — VII

I — IV — VI   I — III — VI

De ces deux progressions, la première, qui aboutit à l'accord dont la basse fondamentale est IV, a plus de vivacité, parce qu'elle conduit à un accord qui présente deux nouveaux sons. L'autre, au contraire, conduit à l'accord de basse VI avec une seule note nouvelle. Aussi la première est-elle considérée comme la principale résolution des accords de septième, par exemple :



Le son VII en descendant arrive au son VI. Dans le premier cas, c'est la tierce du nouvel accord ; dans le second cas, c'est le son fondamental. Il peut aussi en être la quinte, ce qui donne la progression :

I — III — V — VII

II — IV — VI

mais qui n'est naturelle que dans les deux accords

si — ré — fa — la et *si — ré — fa — la♭*

ut — mi — sol   *ut — mi♭ — sol*

parce que les deux accords de septième représentent le son complexe *sol*, et que l'accord de tonique détermine un lien d'affinité entre leurs deux moitiés. Dans les autres cas, notre dernier schéma donne ce qu'on appelle des cadences rompues (en allemand, *trompeuses*)

sol — si — ré — fa ou *sol — si — ré — fa*

la — ut — mi   *la♭ — ut — mi♭*

qui se justifient, surtout la première comme plus naturelle, parce que l'intervalle *ut — mi* ou *ut — mi♭* de l'accord de résolution appartient

à la résolution naturelle. Aussi Rameau remarque-t-il avec raison, que ce mode de résolution n'est permis que si le IV du second accord est la quarte normale de I dans l'accord de septième.

Les résolutions par septième descendante se trouvent ainsi épuisées. Celles où elle ne change pas de place sont représentées par les schémas suivants :

```
I — III — V — VII    et    I — III — V — VII
 \    \   /    |              \   /    |    |
  II — IV —   VII              II —    V — VII
```

Dans le premier cas la septième est le son fondamental, et dans le second la tierce du nouvel accord. Si c'était la quinte, le nouvel accord coïnciderait exactement avec une portion de l'accord de septième :

```
  I — III — V — VII
VII — III — V — VII
```

Dans ces enchaînements, la résolution se fait vers la sus-dominante. Le mouvement est plus marqué dans le premier cas, où la septième devient son fondamental, que dans tous les autres. Ces résolutions sont, en somme, moins usitées, parce que, dans la plupart des cas, on est parti d'un des accords voisins de la dominante supérieure pour arriver aux accords de septième du système direct. Dans les accords du système indirect, cette progression se présente plus fréquemment, parce que leurs septièmes peuvent aussi entrer en montant, ce qui ne donne pas lieu aux suites de quintes, qui entravent la marche d'un accord de trois sons à l'accord de septième voisin de la sus-dominante.

Enfin, en ce qui concerne le passage d'un accord de septième à un autre, ou à un accord dissonant de trois sons du système indirect, qu'on peut considérer comme l'abréviation d'un accord de septième, ces questions sont suffisamment développées dans les traités d'harmonie, et n'offrent point de difficultés de principe sur lesquelles nous devions nous arrêter.

En revanche nous avons encore à mentionner quelques règles, qui se rapportent au mouvement des parties isolées dans les phrases polyphones. A l'origine, comme nous l'avons expliqué plus haut, dans les phrases de ce genre, toutes les parties étaient d'égale importance, et n'avaient ordinairement qu'à répéter l'une après l'autre les mêmes dessins mélodiques. L'harmonie était l'accessoire, le mouvement mélodique des parties isolées, le principal. On devait, par conséquent, se préoccuper de conserver à chacune des parties, toute sa clarté, et de

la séparer nettement des autres. Le rapport entre l'importance de la mélodie et de l'harmonie s'est modifié d'une manière essentielle dans la musique moderne ; la dernière a pris un rôle beaucoup plus caractérisé. Mais la véritable perfection n'en consiste pas moins en ce que, dans la combinaison de plusieurs parties, chacune ait sa beauté propre, une marche facile à saisir ; le mouvement de l'ensemble restant pour l'auditeur d'une compréhension facile.

C'est là-dessus que repose l'interdiction de ce qu'on a appelé *les octaves et les quintes de suite*. On a beaucoup discuté sur le sens de cette interdiction. La prohibition des octaves de suite trouve d'elle-même son explication dans la pratique musicale. Dans la musique polyphone, il est défendu de faire marcher deux parties, séparées l'une de l'autre par une ou deux octaves, de manière à laisser leur distance invariable. Mais il est également défendu, dans une phrase polyphone, de laisser deux parties se mouvoir à l'unisson pendant quelques notes, ce qui n'empêche pas, dans des reprises entières, de réunir deux ou même toutes les parties à l'unisson, pour donner plus d'énergie à un passage mélodique. Il faut chercher évidemment la raison de ces règles, dans le peu de ressources qu'offrent l'unisson et l'octave à la richesse des combinaisons de parties. Ils peuvent convenir à une phrase manifestement mélodique, mais non à quelques notes dans le cours du morceau, où ils feraient le même effet que si une circonstance fortuite venait compromettre la richesse de l'harmonie. Accompagner une partie inférieure à l'octave supérieure, c'est simplement la reproduire partiellement et cela ne diffère pas essentiellement de l'unisson, là où l'harmonie exige de la variété.

Sous ce rapport, la douzième et son octave inférieure, la quinte, se rapprochent beaucoup de l'octave. Les douzièmes et les quintes de suite présentent donc le même inconvénient que les octaves de suite. Mais elles sont encore plus mauvaises. En effet, tandis que l'accompagnement à l'octave, lorsqu'il est approprié au but poursuivi, peut se prolonger pendant une mélodie tout entière sans donner lieu à des fautes, l'accompagnement continu à la quinte ou à la douzième, entraîne forcément l'altération de la tonalité. On ne peut, en effet, avancer d'un seul degré à partir de la tonique avec accompagnement de quinte, sans quitter la première tonalité. En *ut* majeur, on passerait de la quinte *ut* — *sol* à la quinte *ré* — *la ;* or la gamme a, non le *la* mais le *la* qui est un peu plus bas. En descendant on a *si* — *fa*♯ ; le son *fa*♯ est complétement en dehors de la gamme. On peut continuer d'avancer par quintes naturelles, du *ré* au *la* sans sortir du ton. Il n'est donc pas logique de renforcer le son par un accompagnement de

douzième ou de quinte. D'un autre côté cependant, surtout si les deux intervalles avancent mélodiquement de quelques degrés, il est facile de ne les considérer que comme des renforcements du son fondamental. Pour la douzième, cela tient à ce qu'elle correspond directement à l'un des harmoniques. Dans la quinte *ut* — *sol*, l'*ut* et le *sol* font l'effet des deux harmoniques du son résultant ut_{-1}, qui accompagne la quinte. L'accompagnement à la quinte, lorsqu'il se présente seul dans une phrase à plusieurs parties, encourt donc le reproche de monotonie et ne peut logiquement être employé ; il faut donc l'éviter dans tous les cas.

D'ailleurs, si les quintes de suite répugnent aux lois de la composition musicale, ce n'est pas qu'elles sonnent mal pour l'oreille ; c'est suffisamment prouvé par ce fait, que presque tous les sons de la voix et de la plupart des instruments sont accompagnés de douzièmes, et que c'est sur cet accompagnement même que repose toute la structure de notre système musical. Par conséquent, tant que les quintes apparaissent comme éléments mécaniquement constitutifs du son, elles sont pleinement justifiées. C'est ce qui arrive pour les jeux de fourniture de l'orgue. Dans ces registres les tuyaux qui donnent le son fondamental, sont toujours associés à d'autres qui en donnent les harmoniques, les octaves, les douzièmes, plusieurs fois redoublées et même la tierce haute. De cette manière, comme on l'a expliqué plus haut, on obtient artificiellement un son plus timbré, plus mordant que celui des tuyaux d'orgue simples, avec leurs harmoniques relativement faibles. Ce n'est que par ce moyen que le son de l'orgue devient assez fort pour dominer le chant d'une foule considérable. Presque tous les théoriciens se sont emportés contre l'accompagnement par quintes ou même par tierces, mais ils n'ont heureusement rien obtenu contre la pratique des facteurs d'orgue. En réalité, les jeux de fourniture ne donnent pas d'autres combinaisons sonores que les instruments à archet, les trombones et les trompettes, exécutant la même musique. Il en serait tout autrement, si nous voulions les remplacer par des voix indépendantes, pour lesquelles nous devrions nous attendre à un mouvement spontané, d'après les lois de la progression mélodique qui sont données dans la gamme. Dans ce cas d'abord, des voix ne peuvent jamais se mouvoir avec l'exacte précision d'un mécanisme ; elles trahiront toujours leur spontanéité par quelques petites fautes, et nous devrons alors les soumettre à la loi de la gamme qui rend logiquement impossible l'accompagnement par quintes.

L'interdiction des quintes et des octaves s'étend aussi, mais avec moins de rigueur, aux intervalles consonnants qui s'en rapprochent le plus, notamment si deux d'entre eux sont composés de manière à

former le groupement coordonné des harmoniques d'un son. Ainsi des successions comme

ré — sol — si
ut — fa — la,

sont, d'après les prescriptions des théoriciens, moins bonnes que

si — ré — sol
la — ut — fa.

C'est qu'en effet, *ré — sol — si* peut être considéré comme l'ensemble du troisième, du quatrième, du cinquième son partiel du son complexe *sol ;* au contraire *si — ré — sol* ne se compose que du cinquième, du sixième et du huitième. Par suite la monotonie sera beaucoup plus nettement prononcée dans la première succession que dans la seconde, que l'on introduit souvent dans de longs passages où elle se change en diverses espèces de tierces et de quartes.

Dans l'histoire de la musique, la proscription des quintes a été une réaction contre les premières et imparfaites tentatives de chant à plusieurs parties, qui se limitaient aux accompagnements par quartes ou quintes. Comme toute réaction, elle fut exagérée dans une époque stérile, où l'inspiration était remplacée par des règles mécaniques, et l'absence des suites de quintes devint le signe caractéristique d'un morceau bien fait. Les harmonistes modernes s'accordent à reconnaître, qu'on ne doit pas renoncer à certaines beautés du mouvement mélodique pour éviter les suites de quintes, quoiqu'il vaille mieux s'abstenir de ces dernières, tant qu'on n'a rien autre chose à sacrifier.

La proscription des quintes se rattache d'ailleurs à un autre point de vue, sur lequel Hauptmann a appelé l'attention. Il n'est pas facile, même en le cherchant, de faire des quintes de suite, quand on passe d'un accord consonnant de trois sons à un de ses proches alliés, parce que, dans ce cas, d'autres chemins s'offrent aux parties. Ainsi, par exemple, on va de l'accord parfait d'*ut* majeur aux quatre accords suivants qui lui sont directement alliés, en donnant à la basse fondamentale une progression par tierces ou par quintes :

ut — mi — sol	*ut — mi — sol*
ut — mi — la	*ut — fa — la*
ut — mi — sol	*ut — mi — sol*
si — mi — sol	*si — ré — sol.*

Mais, si la basse fondamentale procède par secondes et qu'on

ne passe plus à l'accord immédiatement voisin, le nouvel accord, non renversé, introduit une suite de quintes. Par exemple :

sol — si — ré qu *sol — si — ré*
la — ut — mi ou *fa — la — ut.*

Dans un cas semblable, il faut donc chercher une progression de nature différente, par intervalles plus grands, comme :

sol — si — ré ou *sol — si — ré*
mi — la — ut ou *la — ut — fa,*

si on veut éviter les quintes.

Par conséquent, pour les accords alliés entre eux et proches voisins dans la gamme, les suites de quintes disparaissent d'elles-mêmes ; là où elles se présentent, elles témoignent d'une transition trop brusque ; si c'est là le but qu'on poursuit, il vaut mieux donner aux parties une marche plus semblable à celle qui naît d'elle-même dans le passage sur des accords voisins.

La raison, mise en avant par Hauptmann, à propos des successions de quintes, paraît de nature à donner à la loi encore plus d'importance. Ce n'est pas le seul motif de la proscription des quintes ; ce qui le prouve, c'est que la succession interdite

sol — si — ré...... fa — la — ut

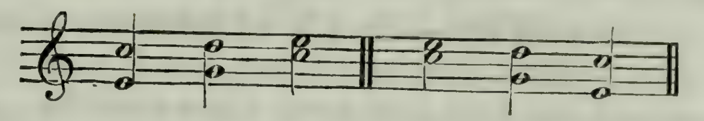
devient permise, si elle a lieu dans les renversements

si — ré — sol...... la — ut — fa,

où la basse fondamentale franchit le même intervalle.

On a rattaché au même paragraphe la proscription de ce qu'on appelle les *quintes* et *octaves cachées*, au moins pour les parties extrêmes d'une phrase polyphone. Cette interdiction signifie que la partie supérieure et la partie inférieure ne doivent pas arriver par un mouvement de même sens à la consonnance d'octave ou de quinte (douzième). Elles doivent plutôt s'y acheminer par mouvement contraire, l'une montant, l'autre descendant. Dans une phrase à deux voix, il en serait de même pour l'unisson. Cette règle signifie simplement que, chaque fois que les parties extrêmes se réunissent sur une note, elles doivent être en repos relatif, l'une par rapport à l'autre. Quand ce cas se présente, le mouvement est mieux équilibré si les parties, qui comprennent entre elles la masse sonore, se rapprochent en venant de points opposés, que si le centre de gravité de l'ensemble est entraîné dans un mouvement de même sens que celui des parties ex-

trêmes, et que celles-ci, animées de vitesses différentes, voient diminuer leur distance naturelle. Mais, quand le mouvement va plus loin en conservant le même sens, et qu'on ne cherche pas à obtenir un point d'arrêt, on n'évite pas les quintes cachées, comme dans la formule connue :



où l'on arrive à l'intervalle *sol — ré* par quintes cachées.

Une autre règle du mouvement mélodique, relative à ce qu'on appelle la *progression horizontale harmonique*, a pris naissance dans les exigences de la voix. Or ce que la voix atteint difficilement, semble toujours à l'oreille une progression inusitée, forcée. Par progression horizontale, on entend le cas où deux notes de deux accords consécutifs, appartenant à des parties distinctes, forment entre elles une fausse octave ou une fausse quinte ; si, par exemple, dans le premier accord une partie donne le si, et dans le second une autre donne le si♭, ou bien la première un *ut* et la seconde un *ut*♯. La progression horizontale par quintes n'est interdite qu'aux parties extrêmes ; elle se présente, par exemple, quand la basse donne un *si* dans le premier accord, et le soprano un *fa* dans le second, ou inversement ; *si — fa* est une fausse quinte. Pour la fausse octave, le sens de cette règle est celui-ci : il est difficile au chanteur d'atteindre la nouvelle note, qui sort de la gamme, lorsqu'il vient d'entendre le son immédiatement voisin dans la gamme, chanté par une autre partie. Il en est de même quand il faut passer à la fausse quinte d'un son très-accusé dans l'harmonie soit en haut, soit en bas. Cette règle présente donc un certain sens, mais elle comporte d'assez nombreuses exceptions, parce que l'oreille des musiciens, des chanteurs et des auditeurs modernes, s'est accoutumée à des combinaisons plus hardies, à un mouvement plus vif.

Toutes ces règles se rapportent essentiellement à une musique qui, comme l'ancien plain-chant, doit couler avec autant de calme, de douceur que possible, partout bien ménagée, régulièrement équilibrée, sans jamais viser à l'énergie, à la puissance dans l'effort. Quand la musique doit exprimer un élan, une excitation plus vive, ces règles perdent leur signification. On trouve même en foule aussi bien des quintes et octaves cachées que des progressions de fausses quintes, même chez Sébastien Bach, l'harmoniste si rigoureux, dans ses *chorals*, où le mouvement est exprimé avec beaucoup plus d'énergie que dans l'ancienne musique d'Église italienne.

CHAPITRE XIX ET DERNIER.

POINTS DE CONTACT AVEC L'ESTHÉTIQUE.

Dans la dernière partie de ce livre, je me suis efforcé de prouver, que la construction des gammes et des formes harmoniques est un produit de l'invention artistique, et nullement le résultat immédiat de la structure ou des activités naturelles de notre oreille, comme on l'a prétendu jusqu'ici le plus souvent. Les lois naturelles de nos activités auditives y jouent, à la vérité, un rôle d'une grande et considérable importance; elles sont, en quelque sorte, les matériaux que le sentiment artistique de l'homme a mis en œuvre, pour élever l'édifice de notre système musical, dont la structure ne peut s'expliquer si l'on ne connaît exactement la nature des parties qui le composent. C'est précisément ce qui ressort très-nettement de l'ensemble de nos études. Mais, de même que les peuples ont été conduits, par la différence de leurs goûts, à construire avec les mêmes pierres des édifices de caractères très-différents, de même aussi nous voyons, dans l'histoire de la musique, les mêmes propriétés de l'oreille humaine servir de base à des systèmes musicaux très-divers. D'après cela, à mon avis, nous ne pouvons douter que non-seulement la naissance des chefs-d'œuvre de la musique, mais même la construction de notre système de gammes, de tons, d'accords, en un mot de tout ce qui rentre ordinairement dans la théorie de l'Harmonie, ne soient une création du sentiment artistique, et, par conséquent, ne doivent être soumises aux lois de la beauté esthétique. Par le fait, depuis Terpandre et Pythagore, pendant une période de deux mille cinq cents ans, l'humanité a travaillé sur le système diatonique auquel elle a fait subir de nombreux changements; et, comme on peut même encore aujourd'hui le reconnaître dans un grand nombre de cas, les compositeurs les plus distingués sont précisément ceux qui ont introduit dans le système musical, les modifications progressives que leur fournissait spontanément leur imagination, ou qu'ils sanctionnaient par la mise en œuvre artistique de matériaux étrangers.

L'analyse esthétique des plus grandes œuvres musicales et l'intelligence des causes de leurs beautés, se heurtent presque toujours encore à des obstacles insurmontables en apparence. Au contraire,

dans le domaine que nous venons d'explorer, de la technique musicale élémentaire, nous avons étendu l'horizon aussi loin que les résultats de nos études ont pu se rattacher aux idées assez généralement admises, dans les temps modernes, sur le principe et le caractère du Beau dans l'art. En réalité, il n'est pas difficile de découvrir entre ces deux éléments, une étroite liaison, une parfaite concordance ; on peut même dire qu'il y a peu d'exemples qui se prêtent plus que la théorie des gammes et de l'harmonie, à élucider quelques-uns des points les plus obscurs et les plus difficiles de l'esthétique générale. Aussi m'a-t-il semblé impossible de passer sous silence les considérations de cet ordre, d'autant plus qu'elles se relient étroitement à la théorie des perceptions sensorielles, et par suite aussi, à la physiologie.

Le Beau est soumis à des lois et à des règles qui tiennent à la nature de la raison humaine ; c'est ce dont on ne peut plus douter aujourd'hui, après avoir réfléchi sur les questions d'esthétique ou après avoir étudié les ouvrages esthétiques modernes. Toute la difficulté est que ces lois et ces règles, de l'observation desquelles dépend le Beau, d'après lesquelles il doit être jugé, ne sont pas les résultats d'un acte conscient de l'intelligence, et ne s'imposent, ne se manifestent, ni à l'artiste composant son œuvre, ni au spectateur ou à l'auditeur qui en jouissent. L'Art poursuit un but, et cependant son œuvre doit présenter l'apparence d'un acte spontané, involontaire du génie. Celui-ci doit créer comme l'imagination travaille, obéissant à une loi, poursuivant un but sans avoir conscience de l'un ni de l'autre. Une œuvre, où nous reconnaîtrons le fruit d'un simple raisonnement, ne sera jamais pour nous une œuvre d'art, si conforme qu'elle soit à son objet. Une œuvre d'art, où nous constaterons l'action d'une réflexion consciente sur la disposition de l'ensemble, nous paraîtra pauvre. « On voit le dessein de l'auteur, et on est refroidi (Goethe). »

Et cependant nous voulons que toute œuvre d'art soit conforme aux lois de la raison ; ce qui le prouve, c'est que nous la soumettons à un examen critique, et que nous cherchons à surexciter les jouissances que nous éprouvons, l'intérêt qui nous captive, en suivant à la trace la régularité du plan, la liaison et l'équilibre de toutes les parties. Nous trouvons l'œuvre d'autant plus riche, que nous arrivons à mieux découvrir l'harmonie et la beauté de tous les détails ; nous considérons comme signe caractéristique d'un chef-d'œuvre, la révélation toujours progressive, par un examen plus approfondi, de la présence de la raison en chacun de ses points, lorsque nous revoyons l'ouvrage, lorsque nous y réfléchissons de plus en

plus. En cherchant, par la critique, à comprendre la beauté d'une œuvre de ce genre, résultat auquel il nous est donné d'atteindre jusqu'à un certain point, nous montrons bien que nous supposons dans l'œuvre d'art un raisonnement que l'intelligence peut découvrir, mais dont la connaissance n'est indispensable ni à la création, ni au sentiment du Beau. Car, dans le jugement immédiatement formulé par un goût artistique délicat, le Beau esthétique sera reconnu comme tel, sans le secours d'aucune réflexion critique ; le sentiment décide que l'œuvre plaît ou ne plaît pas, sans aucune préoccupation d'une loi ou d'une idée quelconque.

Ce qui prouve bien aussi que nous ne considérons pas le bien-être résultant du Beau comme un phénomène fortuit, individuel, mais comme l'effet de la concordance, suivant une loi déterminée, de l'œuvre avec la nature de notre esprit, c'est que nous attendons de tout autre esprit humain en état de santé, qu'il reconnaisse, comme nous, le Beau que nous admirons. Tout au plus admettons-nous que les variétés du goût national ou individuel inclinent vers tel ou tel idéal artistique, auxquels elles sont plus sensibles ; il faut cependant, on ne peut le nier, une certaine éducation, une certaine habitude des belles œuvres, pour en acquérir la complète intelligence.

La principale difficulté, dans ce domaine, consiste à comprendre comment nous pouvons apprécier par intuition la conformité d'une œuvre aux lois de la raison, sans que nous ayons réellement conscience de ces dernières. Et cette intuition inconsciente des lois esthétiques, n'est pas, dans l'action du Beau sur notre esprit, un accessoire qui peut être ou ne pas être ; il est évident, au contraire, qu'elle en est précisément le point capital, saillant. Partout, en effet, où nous percevons les traces d'une loi, d'une coordination, d'une ordonnance régulières, sans pouvoir néanmoins complétement apercevoir le plan et la loi de l'ensemble, l'œuvre d'art fait naître en nous le sentiment d'une raison supérieure, qui s'étend bien loin au delà de ce que nous pouvons embrasser du regard, et à laquelle nous ne voyons ni bornes ni limites. Nous souvenant des paroles du poëte :

« Vous égalez l'esprit, que vous pouvez comprendre, »

nous avons le sentiment des forces spirituelles qui ont travaillé chez l'artiste, et qui laissent loin derrière elles notre pensée consciente, rien qu'en nous voyant forcés d'admettre qu'il nous faudrait au moins, si c'était possible, un temps, une méditation, un travail également infinis pour arriver, par la réflexion consciente, au degré d'ordre, de logique, d'équilibre entre toutes les parties et tous les rapports inti-

mes, auquel l'artiste est parvenu d'un bond, simplement guidé par son goût, son sentiment instinctif, et qu'à la lueur des mêmes flambeaux, de notre goût, de notre sentiment propre, nous savons apprécier et comprendre, longtemps avant d'avoir commencé à soumettre l'œuvre d'art à l'analyse de la critique.

Il est évident que c'est là-dessus que repose la haute estime que nous faisons de l'artiste et de l'œuvre. Nous honorons dans le premier un souffle, une étincelle de la puissance créatrice divine, qui sort des limites des efforts conscients et raisonnés de notre pensée. Et cependant l'artiste n'est qu'un homme comme nous, disposant des mêmes forces spirituelles, seulement avec plus de justesse, plus de clarté, plus d'équilibre dans leurs directions respectives; en comprenant nous-mêmes plus ou moins vite, plus ou moins complétement le langage de l'artiste, nous sentons que nous avons en nous une portion de ces forces qui ont enfanté tant de merveilles! C'est évidemment là qu'il faut chercher la raison de l'exaltation morale, du sentiment de complète béatitude, que l'homme trouve en s'inclinant devant les œuvres d'art véritablement sublimes. Nous apprenons d'elles à sentir que, même dans les sombres profondeurs d'un esprit humain sainement et harmonieusement développé, dans ces retraites encore inaccessibles, au moins actuellement, à l'analyse de la pensée consciente, dort le germe d'un ordre raisonné, susceptible de plus riches développements; nous apprenons aussi, par une préparation à un sujet de même importance, à reconnaître et à admirer dans l'œuvre d'art l'image d'un ordre semblable, qui règne dans l'univers où dominent partout la Loi et la Raison. C'est surtout la foi en la nature originairement saine de l'esprit humain, tel qu'il doit être quand il n'est pas abattu, flétri, troublé ou faussé, que la contemplation des belles œuvres d'art éveille en nous.

Mais, dans tous ces différents cas, il est toujours essentiel que la conformité d'une œuvre à sa loi, à son but, ne puisse être embrassée dans toute son étendue par un raisonnement conscient. C'est précisément par la portion qui échappe aux aperçus conscients de l'intelligence, que l'œuvre d'art produit en nous l'exaltation et la béatitude; c'est de là que naissent les plus puissants effets du Beau artistique, et non des parties que nous pouvons complétement analyser.

Appliquons ces considérations au système des sons et de l'harmonie; ce sont là des matières qui font partie d'un domaine tout à fait subalterne et élémentaire, mais ce sont aussi les fruits, lentement mûris, du goût artistique des musiciens, et par suite, elles doivent obéir aux lois générales du Beau artistique. C'est précisément parce que nous restons encore ici dans le domaine inférieur de la technique

de l'art, et que nous n'avons pas affaire à l'expression de problèmes psychologiques plus intimes, que nous arrivons à une solution relativement simple et facile à saisir, de cette question fondamentale de l'esthétique.

Dans toute la dernière partie de ce livre, on a expliqué comment les musiciens ont successivement trouvé des relations d'affinité entre les sons et les accords, comment, par la découverte de la musique harmonique, ces relations sont devenues plus étroites, plus claires, plus riches. Nous avons pu déduire le système entier des règles qui constituent la théorie de l'harmonie, de la tendance à introduire une liaison nettement appréciable dans la série des sons d'un morceau de musique.

C'est le sentiment de l'affinité mélodique des sons consécutifs qui s'est développé en premier lieu, d'abord pour l'octave et la quinte, ensuite pour la tierce. Nous nous sommes efforcé de prouver, que ce sentiment d'affinité reposait sur la sensation d'harmoniques identiques dans les sons considérés. Ces harmoniques existent dans la sensation éprouvée par l'appareil des nerfs de l'audition, et, cependant, ils ne sont pas habituellement l'objet d'une perception consciente, comme les autres sensations ayant une existence propre. Dans la vie ordinaire, on n'a conscience que du son dont ils font partie, perçu comme un tout, à peu près comme nous ramenons à une sensation unique le goût d'un mets composé, sans nous rendre un compte exact des quantités de sel, de poivre, d'épices et autres ingrédients dont il est formé. C'est à une étude critique de nos sensations auditives, prises en elles-mêmes, qu'il appartenait de découvrir l'existence des harmoniques. Aussi, en laissant de côté certaines hypothèses plus ou moins vaguement formulées, comme celle de Rameau et de d'Alembert par exemple, la cause particulière de l'affinité mélodique des sons est restée inconnue, ou du moins n'a pas été présentée avec le degré de clarté et de précision qu'elle comporte. Je crois être arrivé à ce dernier résultat, et avoir nettement mis en évidence le lien général de l'ensemble. Le problème esthétique se trouve donc ramené à la particularité caractéristique de toutes les perceptions fournies par les sens, en vertu de laquelle nous considérons des agrégats de sensations distinctes comme les symboles sensoriels non décomposables des objets extérieurs simples, en ne dirigeant jamais notre attention, dans l'analyse de nos sensations, que vers la direction nécessaire pour arriver à des représentations exactes du monde extérieur, sans nous préoccuper d'abord de la manière dont nous arrivons à ces représentations elles-mêmes (1).

(1) Cette question est traitée avec beaucoup plus de développements dans l'*Optique physiologique*, du même auteur. Traduction Javal et N. Klein, p. 561 et suivantes.

Après s'être longtemps contentés des affinités mélodiques des sons, les musiciens commencèrent au moyen âge, à en utiliser les affinités harmoniques qui se révèlent dans la consonnance. Les effets produits par les différents assemblages de sons simultanés, reposent en partie sur l'identité ou la dissemblance de leurs harmoniques respectifs, en partie sur les sons résultants. Mais, tandis que, dans l'affinité mélodique, l'identité des harmoniques ne peut être constatée, d'un son à un autre, que par la *mémoire*, elle sera déterminée, dans la consonnance, par un phénomène de *sensation directe*, c'est-à-dire par les battements. Dans l'assemblage harmonique des sons, par conséquent, leurs affinités s'accusent avec une vivacité supérieure de toute la quantité, dont une sensation *actuelle* surpasse le *souvenir* d'une sensation. En même temps, la richesse des relations nettement perceptibles s'accroît avec le nombre des sons résonnant simultanément. Quant aux battements, il est facile de les reconnaître sous cette forme quand ils sont lents ; mais ceux caractéristiques de la dissonnance, appartiennent presque sans exception à la catégorie des battements très-rapides, et sont en partie couverts par d'autres sons prolongés, ne battant pas ; aussi, une comparaison minutieuse des battements lents et des battements rapides, devait-elle démontrer que c'est précisément dans ces derniers que réside l'essence de la dissonnance. Des battements lents ne font pas l'effet de la dissonnance ; il en faut au contraire de rapides que l'oreille ne peut plus suivre, et qui donnent des impressions confuses. L'oreille sent ici la différence entre la pureté de la combinaison de deux sons consonnants, et la confusion, la dureté d'une dissonnance. Quant à la cause de cette dureté, de cette confusion, elle reste ordinairement tout à fait inconnue à l'auditeur.

Les progrès de l'harmonie fournirent à l'art musical, l'occasion de prendre un développement beaucoup plus riche que par le passé, en lui permettant d'utiliser, grâce aux affinités sonores devenues beaucoup plus accusées dans les accords isolés ou consécutifs, des relations beaucoup plus éloignées, notamment celles sur lesquelles reposent les modulations. Par là s'accroissait la richesse des moyens d'expression, aussi bien que la rapidité des transitions mélodiques et harmoniques, devenues possibles, sans briser le lien de l'ensemble.

Au quinzième et au seizième siècle, quand on apprit à connaître la signification propre des accords, le sentiment de leurs affinités, soit entre eux, soit avec l'accord de tonique, se développa exactement suivant la même loi que celui de l'affinité des sons isolés, longtemps resté inconscient. Celle-ci reposait sur l'identité d'un ou de plusieurs harmoniques; l'affinité des accords, sur l'identité d'une ou de plusieurs

notes. Pour le musicien, il est vrai, la loi de l'affinité des accords et des tons est beaucoup plus facile à saisir que celle des sons isolés. Il lui est facile de percevoir les notes identiques, par l'audition ou en les voyant écrites. Quant à l'auditeur non prévenu, la raison de la pureté, de l'harmonie d'une série d'accords, reste aussi bien cachée pour lui que celle de l'enchaînement des notes d'une belle mélodie. Une cadence rompue le surprend, lui donne le sentiment de l'inattendu, sans qu'il ait nécessairement conscience du pourquoi.

Nous avons vu alors que la raison qui, dans la musique, assigne à un accord un son fondamental déterminé, repose encore sur la décomposition des sons complexes en sons partiels, c'est-à-dire encore sur des éléments de la sensation, dont il n'est pas facile d'avoir conscience comme répondant à des causes objectives distinctes. Mais cette relation entre les accords a une grande importance, tant pour le rapport de l'accord de tonique avec la tonique elle-même, que dans les successions d'accords.

La constatation de ces ressemblances entre les sons et les accords, rappelle d'autres expériences tout à fait du même ordre. Nous sommes souvent forcés de reconnaître la ressemblance des visages de deux proches parents, quoique nous soyons assez rarement en état de découvrir où elle réside, surtout lorsque, par les différences d'âge et de sexe, les traits principaux des deux figures présentent les plus grandes dissemblances. Et cependant, malgré cette différence, malgré l'impossibilité où nous sommes de désigner isolément les parties du visage qui sont identiques, la ressemblance peut être si frappante, si manifeste, que nous n'en pouvons douter un seul instant. Il en est exactement de même de la constatation de l'affinité de deux sons.

De même aussi, nous sommes souvent en état de reconnaître avec la plus grande précision qu'une phrase, à nous inconnue, d'un écrivain ou d'un compositeur dont nous connaissons d'autres ouvrages, leur appartient. Quelquefois, mais pas toujours, loin de là, ce sont certaines tournures de phrases, certaines cadences caractéristiques qui déterminent notre jugement; mais dans la grande majorité des cas, il nous serait impossible de dire où réside la ressemblance avec d'autres œuvres connues du même auteur.

L'analogie entre ces différents cas va même encore plus loin. Quand, par exemple, le père et la fille se ressemblent d'une manière frappante par la forme générale du nez ou du front, nous le remarquons facilement, mais la chose ne nous préoccupe pas plus longtemps. Si, au contraire, la ressemblance reste assez bien cachée pour que nous ne puissions la trouver, nous sommes piqués au jeu, nous ne cessons de

comparer les deux visages. Si un peintre nous présente deux têtes, ayant un caractère distinct, une expression différente, et où domine cependant une ressemblance frappante et indéfinissable, c'est là, sans aucun doute, ce que nous apprécierons comme une des principales beautés de son tableau. Et notre admiration, dans ce cas, ne s'adresserait pas du tout à l'adresse technique; nous verrions là, non pas seulement un échantillon d'habileté, mais un sentiment extraordinairement délicat de la signification des traits du visage, et c'est là que nous trouverions la justification artistique d'une œuvre de ce genre.

Il en est encore exactement de même des intervalles musicaux. La ressemblance d'un son avec son octave est si grande, si saisissante, qu'elle frappe même l'oreille la moins subtile; l'octave, par conséquent, fait presque l'effet d'une répétition pure et simple du son fondamental, et, en réalité, elle ne fait qu'en reproduire une portion, sans y ajouter aucun élément nouveau. Au point de vue de l'effet esthétique, l'octave est donc un intervalle parfaitement clair, mais peu intéressant. Ceux qui offrent le plus d'intérêt, en mélodie ou en harmonie, sont évidemment les tierces et les sixtes, qui sont précisément à la limite des intervalles dont l'oreille peut encore se rendre compte. Les tierces et sixtes majeures, pour être intelligibles, exigent la présence des quatre premiers harmoniques, qui se rencontrent aussi dans les bons timbres musicaux. Les tierces et sixtes mineures ne se justifient guère que comme renversements des précédentes. Les intervalles plus compliqués de la gamme n'ont plus d'affinités directes et facilement intelligibles. Aussi n'ont-ils plus l'action propre aux tierces.

Je termine ici mon travail. Autant que j'en puis juger, j'ai été aussi loin que les propriétés physiologiques des sensations auditives exercent une influence directe sur la construction du système musical, aussi loin surtout que le travail rentrait dans les attributions d'un savant. Car, si des questions scientifiques et esthétiques se sont trouvées mêlées dans mon étude, les secondes étaient d'une nature relativement simple, les premières présentaient une complication beaucoup plus grande; c'est nécessairement l'inverse qui aurait lieu si on voulait chercher à pénétrer plus avant dans l'esthétique musicale, si on voulait passer à la théorie du rhythme, de la forme des morceaux, envisagés comme moyens d'expression. Dans toutes ces régions, les propriétés de la sensation exerceront çà et là quelque influence, mais seulement d'une manière très-subalterne. La grande difficulté consistera dans le développement des mobiles psychiques qui se trouvent en jeu. C'est là, il est vrai, que commence la partie la plus intéressante de l'esthétique musicale, — il s'agit d'expliquer les merveilles des grandes

œuvres, d'apprendre à connaître les mouvements extérieurs ou intérieurs des différentes dispositions de l'âme. Quel que soit pourtant l'attrait de ces recherches, où j'ai trop le sentiment de n'être qu'un amateur, qu'un *dilettante*, j'aime mieux les laisser à d'autres, et rester moi-même sur le terrain de la science auquel je suis habitué.

SUPPLÉMENT

DIMENSIONS ET CONSTRUCTION DES RÉSONNATEURS.

Page 60.

Les résonnateurs qui agissent le mieux sont ceux de forme sphérique, munis d'une sorte de goulot en forme d'entonnoir qu'on entre dans l'oreille (voir *fig.* 16 *a*, p. 59). L'avantage des résonnateurs de ce genre consiste, d'abord, en ce que les autres sons partiels propres sont très-éloignés du son fondamental et ne sont que faiblement renforcés, ensuite en ce que la forme sphérique donne la résonnance la plus énergique. Mais les parois de la sphère doivent être résistantes et polies, pour pouvoir opposer la résistance nécessaire aux fortes vibrations de l'air intérieur, et pour diminuer aussi peu que possible le mouvement de l'air par le frottement. En commençant, j'utilisais des vaisseaux en verre sphériques tels que je les trouvais, des allonges de cornues, par exemple, à l'orifice desquelles j'ajustais un tube de verre s'adaptant à l'oreille. Plus tard, M. R. Kœnig (constructeur d'instruments d'acoustique, Paris, 30, rue Hautefeuille) m'a construit une série déterminée de sphères en verre. Je donne ici une liste des dimensions de quelques-uns de ces résonnateurs :

HAUTEUR.	DIAMÈTRE DE LA SPHÈRE en millim.	DIAMÈTRE DE L'ORIFICE en millim.	VOLUME EN CENTIMÈTRES CUBES.	OBSERVATIONS.
1) sol_1	154	35,5	1773	Goulot en forme d'entonnoir.
2) $si\flat_1$	131	28,5	1092	
3) ut_2	130	30,2	1053	
4) mi_2	115	30	546	
5) sol_2	79	18,5	235	
6) $si\flat_2$	76	22	214	
7) ut_3	70	20,5	162	
8)	53,5	8	74	Goulot cylindrique, de même, ouverture latérale, goulot cylindrique.
9) $si\flat_3$	46	15	49	
10) $ré_4$	43	15	37	

Je n'ai pas trouvé qu'il y eût lieu de faire usage de résonnateurs plus petits. Peut-être sera-t-il plus avantageux de construire les résonnateurs en métal battu résistant. J'avais cassé deux sphères, correspondant à des sons intermédiaires entre l'ut_2 et le $si\flat_3$. J'ai cherché à les remplacer

par des tubes cylindriques analogues à celui de la figure 16 *b* dont les dimensions étaient les suivantes :

NUMÉROS.	HAUTEUR.	LONGUEUR en MILLIMÈTRES.	LARGEUR en MILLIMÈTRES.	VOLUME en CENTIM. CUBES.	OBSERVATIONS.
1	*ré*$_3$	133	25	56	à demi-fermé.
2	*fa*$_3$	123	21	30	*idem.*
3	*sol*♭$_3$	114	24	50	*idem.*
4	*la*$_3$♭	125	20	39	ouvert.

Pour les sons tout à fait graves, j'employais des tubes de carton présentant à l'une de leurs extrémités un orifice circulaire ; l'autre bout était muni d'un tube de verre s'adaptant au conduit auditif. J'en employais deux présentant les dimensions suivantes :

NUMÉROS.	HAUTEUR.	LONGUEUR.	LARGEUR.	DIAMÈTRE DU TROU.
5	*si*♭	690	96	73
6	*ré*$_1$♭	480	60	23

Dans les résonnateurs en forme de tubes, le second son propre, correspondant à peu près à la douzième du son fondamental, peut se produire d'une manière appréciable.

Les résonnateurs, dont l'orifice est très-étroit, donnent, en général, un renforcement du son beaucoup plus considérable, mais ils exigent aussi un unisson d'autant plus parfait entre le son extérieur et leur son propre. C'est comme dans le microscope ; plus le grossissement est fort, moins le champ de la vision est étendu. En diminuant la grandeur de l'orifice, on abaisse le ton du résonnateur et c'est là un moyen facile de les amener à la hauteur voulue. Mais, d'après la raison exposée ci-dessus, on ne peut pas rétrécir beaucoup cette ouverture.

Depuis, M. Kœnig, de Paris, a construit en métal des résonnateurs analogues à ceux représentés (*fig.* 16 *a*). Des tubes coniques en laiton, comme M. Appien en a construit pour moi, sont d'une exécution facile et se prêtent à la plupart des applications. Il faut seulement remarquer que ces tubes répondent aussi aux harmoniques de leur son propre.

Il y a lieu d'exposer ici la méthode inventée par M. Kœnig, pour rendre visibles les vibrations de l'air au moyen de flammes gazeuses ; elle peut très-bien s'appliquer aux résonnateurs. Ce qu'il y a de mieux,

c'est de prendre des sphères creuses munies de deux orifices d'égales dimensions. L'un d'eux aboutit à la petite capsule par où s'écoule le gaz. Cette capsule est une petite cavité assez grande pour contenir deux pièces d'un franc superposées ; elle est insérée dans un disque en bois, et n'est close du côté du résonnateur que par une membrane de caoutchouc très-mince, qui établit la séparation entre les deux gaz, mais qui n'affaiblit pas d'une manière appréciable la communication des vibrations de l'air. Le disque en bois est traversé par deux tubes étroits dont l'un introduit le gaz d'éclairage, et l'autre le fait sortir. Ce dernier se termine suivant une pointe effilée, au bout de laquelle on allume le gaz. Dès que la masse d'air du résonnateur entre en vibrations, la flamme se met aussi à trembler, s'allongeant et se raccourcissant successivement. Mais ces trépidations sont si rapides et si régulières, que la flamme, vue directement, semble tout à fait en repos. On peut déjà cependant constater les différents états, par les changements de forme et de couleur. Si on regarde la flamme dans un miroir tournant rapidement, où elle projette une image allongée à l'état de repos, elle se sépare en deux images distinctes dès qu'elle entre en vibrations. Ce phénomène peut être vu par un grand nombre de spectateurs, et leur permet de reconnaître si le son émis fait ou non vibrer par influence l'air du résonnateur.

SUPPLÉMENT II

MOUVEMENT DES CORDES PINCÉES.

Page 72.

Soient x la distance d'un point d'une corde à l'une des extrémités, l la longueur de la corde, en sorte que pour l'une des extrémités $x = 0$ et pour l'autre $x = l$. Il suffit d'étudier le cas où la corde vibre dans un seul plan passant par sa position d'équilibre. Soient y la distance du point x à sa position d'équilibre au bout du temps t, μ le poids de l'unité de longueur et S la tension de la corde ; les conditions du mouvement sont données par l'équation suivante :

$$\mu \frac{d^2y}{dt^2} = \mathrm{S}\frac{d^2y}{dx^2}\,; \tag{1}$$

et comme les extrémités de la corde doivent être considérées comme immobiles, on doit avoir

$$y = 0$$

si

$$x = 0 \text{ ou } x = l. \tag{1a}$$

L'intégrale la plus générale de l'équation (1), qui remplit les condi-

tions (1 *a*) et correspond à un mouvement périodique est la suivante :

$$y = A_1 \sin \frac{\pi x}{l} \cos 2\,\pi n t + A_2 \sin \frac{2\pi x}{l} \cos 4\pi t \qquad (1\,b)$$
$$+ A_3 \sin \frac{3\pi x}{l} \cos 6\,\pi n t + \text{etc.}$$
$$+ B_1 \sin \frac{\pi x}{l} \sin 2\,\pi n t + B_2 \sin \frac{2\ x}{l} \sin 4\pi t$$
$$+ B_3 \sin \frac{3\pi x}{l} \sin 6\pi n t + \text{etc.}$$

où

$$n^2 = \frac{S}{4\,\mu l^2}$$

et A_1, A_2, A_3 ainsi que B_1, B_2, B_3 sont des constantes. Leur valeur peut être déterminée si on connaît pour une certaine valeur de t, la forme de la corde et la vitesse de ses différents points.

Pour l'instant $t = 0$ la forme de la corde est donnée par la formule

$$y = A_1 \sin \frac{\pi x}{l} + A_2 \sin \frac{2\pi x}{l} + A_3 \sin \frac{3\pi x}{l} + \text{etc} \qquad (1c)$$

et la vitesse par

$$\frac{dy}{dt} = 2\pi n \left\{ B_1 \sin \frac{\pi x}{l} + 2B_2 \sin \frac{2\pi x}{l} + B_3 \sin \frac{3\pi x}{l} + \text{etc.} \right\} \qquad (1d)$$

Supposons maintenant que la corde ait été déviée de sa position d'équilibre au moyen d'une pointe aiguë, et qu'on ait enlevé cette dernière au temps $t = 0$, de manière qu'à ce moment les vibrations aient commencé ; la vitesse de la corde est nulle au temps $t = 0$ et $\frac{dy}{dt} = 0$ pour chacune des valeurs de x; cela ne peut avoir lieu que si, dans l'équation (1 *d*),

$$0 = B_1 = B_2 = B_3, \text{ etc.}$$

Les coefficients A dépendent de la forme de la corde au temps $t = 0$. Au moment où la pointe quitte la corde, celle-ci a dû avoir la forme, représentée (*fig.* 18 A, p. 75), de deux droites tirées de l'extrémité de la pointe aux deux points d'attache. Appelons a et b les valeurs de x et de y pour le point touché par la pointe, les valeurs de y au temps $t = 0$ étaient :

$$y = \frac{bx}{a} \qquad (2)$$

si

$$a > x > 0$$

et

$$y = b\,\frac{l - x}{l - a} \qquad (2\,a)$$

si

$$l > x > a,$$

et les valeurs de y tirées de (1 *c*) et de (2) ou de (2 *a*) doivent être identiques.

Pour trouver le coefficient A_m, comme on sait, on multiplie les deux

membres de l'équation (1 c) par $\sin \frac{m\pi x}{l}\, dx$ et on intègre de $x = 0$ à $x = l$. L'équation (1 c) se réduit alors à

$$A_m \int_0^l \sin^2 \frac{m\pi x}{l}\, dx = \int_0^l y \sin \frac{m\pi x}{l}\, dx. \qquad (2b)$$

où il faut remplacer y par les valeurs tirées de (2) et de (2 a). En effectuant l'intégration dans (2 b) on obtient

$$A = \frac{2bl^2}{m^2\pi^2 a\,(l - a)} \sin \frac{m\pi a}{l} \qquad (3).$$

Donc A_m devient nul et, par conséquent, le m^{me} son partiel de la corde fait défaut quand

$$\sin \frac{m\pi a}{l} = 0,$$

c'est-à-dire quand $a = \frac{l}{m}$, ou $\frac{2l}{m}$, ou $\frac{3l}{m}$, etc. Donc, si on suppose la corde partagée en m parties égales et ébranlée en un des points de division, il manquera le m^{me} son partiel, dont les nœuds coïncident avec les points de division dont il s'agit.

Chacun des nœuds du m^{me} son partiel étant en même temps un nœud des $2m^{me}$, $3m^{me}$, $4m^{me}$, etc., ces derniers disparaîtront tous en même temps.

On peut aussi, comme on sait, mettre sous la forme suivante l'intégrale de l'équation (1) :

$$y = \varphi(x - at) + \psi(x + at) \qquad (4)$$

où $a^2 = \frac{S}{\mu}$, φ et ψ sont des fonctions arbitraires. La fonction $\varphi(x - at)$ représente une forme quelconque de la corde, qui s'avance avec la vitesse a, mais sans modification, dans le sens des x positifs, la fonction ψ, une forme de même nature s'avançant avec la même vitesse dans le sens des x négatifs. On doit supposer les deux fonctions connues pour une valeur déterminée du temps, x variant de $-\infty$ à $+\infty$; le mouvement de la corde est alors déterminé.

Notre problème, la question de déterminer le mouvement des cordes pincées, sera résolu sous cette seconde forme si nous pouvons déterminer les fonctions φ et ψ de manière

1° Que pour les valeurs $x = 0$ et $x = l$, la valeur de y soit constamment nulle pour une valeur quelconque de t. Cela a lieu si pour chaque valeur de t

$$\varphi(-at) = -\psi(+at) \qquad (4\ a)$$
$$\varphi(l - at) = -\psi(l + at) \qquad (4\ b)$$

Posons dans la première équation $at = -v$, dans la seconde $l + at = -v$, nous avons

$$\varphi(v) = -\psi(-v)$$
$$\varphi(2l + v) = -\psi(-v)$$

d'où

$$\varphi(2l + v) = -\psi(v) \qquad (5)$$

La fonction φ est donc périodique; quand l'argument croît de $2l$, elle reprend la même valeur. Il en est de même de ψ.

2° Pour $t = 0$, $\frac{dy}{d\psi(t)}$ doit être nul entre les valeurs $x = 0$ et $x = l$. Il s'ensuit que, si nous désignons $\frac{d\psi(y)}{dt}$ par ψ', en égalant à 0 la valeur de $\frac{dy}{dt}$ tirée de l'équation (4), on a

$$\varphi'(x) = \psi'(x).$$

En intégrant par rapport à x :

$$\varphi(x) = \psi(x) + C.$$

Et comme ni y ni $\frac{dy}{at}$ ne changent si nous ajoutons à φ ou si nous retranchons de ψ la même constante, celle-ci, C, est complétement arbitraire; nous pouvons la supposer nulle, et écrire

$$\varphi(x) = \psi(x) \qquad (5a)$$

3° Enfin, comme au temps $t = 0$, entre $x = 0$ et $x = l$, la seule quantité

$$y = \varphi(x) + \psi(x) = 2\varphi(x)$$

doit avoir la valeur représentée dans la figure 18 A, les ordonnées de cette figure, égales à la valeur de $2\varphi(x)$ et de $2\psi(x)$, restent comprises suivant l'équation (5) :

entre	$x = 0$	et	$x = l$
	$x = 2l$	et	$x = 3l$
	$x = 4l$	et	$x = 4l$
		etc.	

Comme, au contraire, de (4 *a*), (4 *b*) et (5) on tire $\varphi(-v) = -\varphi(v)$ et $\varphi(-v) = \varphi(l + v)$, la valeur de $2\varphi(x)$ est donnée par la courbe (*fig.* 18, G) :

entre	$x = -l$	et	$x = 0$
	$x = -3l$	et	$x = -2l$
et de même entre	$x = l$	et	$x = 2l$
entre	$x = 3l$	et	$x = 4l$
		etc.	

Les fonctions φ et ψ sont donc parfaitement déterminées, et, en faisant avancer en sens opposé, avec la vitesse a les deux lignes d'ondes,

on obtient les formes des cordes données dans la figure 18, qui représentent les modifications de la forme au bout d'un douzième de la durée de vibration.

SUPPLÉMENT III

RENFORCEMENT DES SONS SIMPLES PAR LA RÉSONNANCE.

Page 76.

La théorie de la résonnance des tuyaux et des espaces remplis d'air, a été poussée aussi loin que le comportent aujourd'hui les mathématiques, dans mon mémoire intitulé *Théorie des vibrations de l'air dans les tuyaux ouverts à l'extrémité*, inséré dans le Journal de mathématiques de Crelle, Bd. LVII. La comparaison des sons partiels des diapasons et des tuyaux de résonnance correspondants se trouve dans mon mémoire sur les sons résultants, inséré dans les *Annales de Poggendorf*, Bd. XCIX, p. 509 et 510.

J'ajoute ici les dimensions des tuyaux de résonnance mentionnés p. 73, qui avaient été construits pour moi, et adaptés aux diapasons électro-magnétiques qu'on verra plus loin, par M. Fessel de Cologne. C'étaient des tuyaux cylindriques en carton ; les surfaces terminales du cylindre étaient formées par des disques de laiton dont l'un seulement était percé d'une ouverture circulaire. Ces tuyaux n'avaient donc généralement qu'une ouverture, et non pas deux comme les résonnateurs qui sont destinés à s'adapter à l'oreille. On peut faire descendre le ton de ces tuyaux en amoindrissant l'ouverture. Quand il était nécessaire de le faire monter, je jetais un peu de cire dans le tuyau, et je plaçais l'extrémité fermée au-dessus du feu jusqu'à ce que la cire fondît et s'étendit régulièrement sur le fond. On la laisse alors refroidir en tenant le tuyau dans la même position. Pour savoir si un tuyau est trop haut ou trop bas pour le diapason correspondant, on ferme un peu l'ouverture en faisant vibrer le diapason devant elle. Si la résonnance devient plus forte par le rétrécissement de l'ouverture, c'est que le tuyau est accordé trop haut. Si, au contraire, la résonnance s'affaiblit très-nettement quand on commence à fermer l'orifice, le tuyau est accordé trop bas. Les dimensions en millimètres sont les suivantes.

TABLEAU.

NUMÉROS.	HAUTEUR DES SONS.	LONGUEUR DU TUBE.	DIAMÈTRE DU TUBE.	DIAMÈTRE DE L'ORIFICE.
1	*si*♭	425	138	31,5
2	si_1♭	210	82	23,5
3	fa_2	117	65	16
4	si_2♭	88	55	14,3
5	$ré_3$	58	55	14
6	fa_3	53	44	12,5
7	la_3♭	50	39	11,2
8	si_3♭	40	39	11,5
9	$ré_4$	35	30,5	10,3
10	fa_4	26	26	8,5

La théorie de la vibration par influence de la corde peut très-bien se déduire de l'expérience décrite p. 77. Nous conservons les notations adoptées dans le supplément II, et nous admettons que l'extrémité de la corde, pour laquelle $x = 0$, soit attachée à la tige du diapason, et que celle-ci lui communique un mouvement donné par l'équation

$$y = \text{A} \sin mt \quad \text{pour} \quad x = 0. \qquad (6)$$

Supposons l'autre extrémité appuyée sur le chevalet qui repose sur la table d'harmonie. Le chevalet est soumis à l'action des forces suivantes :

1° La pression de la corde qui tantôt augmente, tantôt diminue selon l'angle que fait la portion terminale de la corde dans le voisinage du chevalet. La tangente de l'angle formé par la direction variable de la corde et la position d'équilibre, est $\frac{dy}{dx}$ et, par conséquent, nous pouvons poser la partie variable de la pression égale à

$$- \text{S} \frac{dy}{dx}$$

pour la valeur $x = l$ si le chevalet est placé du côté des y négatifs.

2° L'élasticité de la table d'harmonie qui tend à ramener le chevalet à sa position d'équilibre ; nous pouvons l'écrire — $f^2 y$.

3° La table d'harmonie qui se meut avec le chevalet, éprouve de la résistance de l'air auquel elle abandonne une partie de son mouvement, nous pouvons supposer cette résistance de l'air à peu près proportionnelle à la vitesse de son mouvement, et, par conséquent, égale à $-g^2 \frac{dy}{dt}$.

Nous obtenons donc pour le mouvement du chevalet dont la masse est M, et, pour le mouvement correspondant de l'extrémité de la corde qui s'appuie sur lui :

$$\text{M} \frac{d^2y}{dt^2} = - \text{S} \frac{dy}{dx} - f^2 y - g^2 \frac{dy}{dt} \text{ pour } x = l. \qquad (6\,a)$$

Pour le mouvement des autres points de la corde, nous avons, comme dans le supplément II, la condition

$$\mu \frac{d^2y}{dt^2} = S \frac{d^2y}{dx^2} \qquad (1)$$

Comme tout mouvement d'une corde de cette nature se communiquera en partie à l'air renfermé dans la caisse de résonnance, il s'éteindra nécessairement s'il n'est entretenu par quelque cause persistante. Nous pouvons donc faire abstraction de l'état variable du mouvement initial, et rechercher le mouvement périodique qui s'établit et persiste, sous l'influence de l'ébranlement périodique imprimé à l'extrémité de la corde par le diapason. Il est évident que la période du mouvement de la corde doit être égale à la période de vibration du diapason. L'intégrale de l'équation (1), que nous cherchons, sera donc de la forme

$$\left.\begin{aligned} y = D \cos(px) \sin(mt) + E \cos(px) \cos(mt) \\ + F \sin(px) \sin(mt) + G \sin(px) \cos(mt) \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

Pour satisfaire à l'équation (1) il faut que l'on ait

$$\mu m^2 = S p^2. \qquad (7\,a)$$

De l'équation (7) on tire, pour $x = 0$, la valeur suivante de y

$$y = D \sin(mt) + E \cos(mt),$$

d'où, par la combinaison avec l'équation (6) :

$$D = A; \quad E = 0. \qquad (8)$$

Les deux autres coefficients de l'équation (7), à savoir F et G, doivent être déterminés au moyen de l'équation (6 a). Celle-ci, par la substitution de la valeur de y tirée de (7), se divise en deux équations, en égalant à zéro la somme des termes multipliés par sin (mt) et la somme des termes multipliés par cos (mt). Ces deux équations sont :

$$\left.\begin{aligned} F[(f^2 - Mm^2) \sin pl + pS \cos pl] - Gmg^2 \sin pl \\ = - A[(f^2 - Mm^2) \cos pl - pS \sin pl] \\ Fmg^2 \sin pl + G[(f^2 - Mm^2) \sin pl + pS \cos pl] = - Ag^2m \cos pl \end{aligned}\right\} \qquad (8\,a)$$

En posant, pour abréger

$$\left.\begin{aligned} \frac{pS}{f^2 - Mm^2} = \text{tang } k \\ (f^2 - Mm^2)^2 + p^2S^2 = C^2 \end{aligned}\right\} \qquad (8\,b)$$

on obtient les valeurs suivantes pour F et G

$$\left.\begin{aligned} F = -\frac{A}{2} \cdot \frac{C^2 \sin 2(pl + k) + g^4m^2 \sin 2(pl)}{C^2 \sin^2 (pl + k) + g^4m^2 \sin^2 (pl)} \\ G = - A \cdot \frac{Cmg^2 \sin k}{C^2 \sin^2 (pl + k) + m^2g^4 \sin^2 (pl)} \end{aligned}\right\} \qquad (8\,c)$$

Si on désigne par I l'amplitude de la vibration de celle des extrémités qui repose sur le chevalet et met en mouvement la table d'harmonie, on a, d'après l'équation (7)

$$I^2 = [F \sin pl + A \cos pl]^2 + G^2 \sin^2 pl,$$

et, en substituant les valeurs de F et de G, tirées de (8 c)

$$I = \frac{AC \sin k}{\sqrt{C^2 \sin^2 (pl + k) + m^2 g^4 \sin^2 (pl)}} \cdot \quad (9)$$

Le numérateur de cette expression est indépendant de la longueur de la corde. En changeant cette longueur, on ne peut modifier que le dénominateur. Sous le radical, on a ici la somme de deux carrés, qui ne peut être nulle, car les quantités m, g, p, s et par conséquent k, ne peuvent devenir nulles. Il faut, en tout cas, considérer le coefficient g de la résistance de l'air comme infiniment petit. Par conséquent, le dénominateur atteint son minimum et I son maximum, quand

$$\sin (pl + k) = 0$$

ou si

$$pl = \alpha\pi - k \quad (9\ a)$$

où α désigne un nombre entier quelconque. La valeur maxima de I est

$$I_M = \frac{AC}{mg^2}.$$

Elle est donc, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus grande que g, le coefficient de la résistance de l'air, est plus petit, et que C est plus grand. Pour pouvoir déterminer de quelles circonstances dépend la valeur de C, substituons la valeur de p^2 tirée de (7 a) dans la seconde des équations (8 b) qui définit la valeur de C et posons en outre

$$n^2 = \frac{f^2}{M},$$

on a

$$C^2 = M^2 (n^2 - m^2)^2 + S\mu m^2.$$

La quantité n représente le nombre de vibrations qu'exécuterait le chevalet en 2π secondes, sous la seule influence de l'élasticité de la table d'harmonie, si la corde et la résistance de l'air faisaient défaut ; m représente le même nombre de vibrations pour le diapason. On peut donc écrire le maximum de I :

$$I_M = \frac{A}{g^2} \sqrt{M^2 \left(1 - \frac{n^2}{m^2}\right)^2 + S\mu}$$

où tout est ramené aux forces M, S, μ et à la grandeur de l'intervalle $1 - \frac{n}{m}$.

Il est donc avantageux de donner une assez grande valeur au poids du chevalet M. Aussi, l'avais-je construit en laiton. Si M devient très-grand, K (d'après 8 *b*) devient très-petit, et l'équation (9*a*) montre alors que les différents sons de plus forte résonnance se rapprochent d'autant plus des valeurs qui correspondent à la série des nombres entiers simples. Plus le chevalet est lourd, mieux la corde est déterminée.

Les règles données ici sur l'influence du chevalet ne s'appliquent qu'au cas où la corde est ébranlée au moyen d'un diapason, et non aux autres modes d'ébranlement.

SUPPLÉMENT IV

FORME DE LA VIBRATION DES CORDES DE PIANO.

Page 105.

Quand une corde tendue est frappée par une pointe métallique, résistante et fine, qu'on retire à l'instant, la secousse imprime une certaine vitesse au point touché de la corde, tandis que tous les autres sont encore en repos. Posons pour l'instant de la secousse $t=0$; nous pouvons déterminer le mouvement de la corde, par la condition qu'au moment de la secousse la corde se trouve encore dans la position d'équilibre, et que le point touché seul ait une certaine vitesse. Il faut donc, dans les équations (1 *c*) et (1 *d*), supplément II, pour $t=0$, poser aussi $y=0$, et $\frac{dy}{dt}=0$, en exceptant de cette dernière équation le point touché dont l'ordonnée est a.

Il s'ensuit que

$$0=A_1=A_2=A_3, \text{ etc.}$$

et que les valeurs de B se trouvent au moyen d'une intégration analogue à celle de (2 *b*) :

$$2\pi nm B_m \int_0^l \sin^2 \frac{m\pi x}{l}\, dx = \int_0^l \frac{dy}{dt} \cdot \frac{m\pi x}{l}\, dy$$

$$\pi nml B_m = c \sin \frac{m\pi a}{l},$$

où c désigne le produit de la vitesse de la partie ébranlée de la corde multipliée par la longueur infiniment petite de cette portion. On a donc

$$y = \frac{c}{\pi nl}\left(\frac{\sin \pi a}{l}\,\frac{\sin \pi x}{l} \sin 2\pi nt + \frac{1}{2}\,\frac{\sin 2\pi a}{l} \sin \frac{2\pi x}{l} \sin 4\pi nt \right.$$
$$\left. + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi a}{l} \sin \frac{3\pi x}{l} \sin 6\pi nt \text{ etc.}\right)$$

$$B_m = \frac{\pi\, nlm}{c} \sin \frac{m\pi a}{l}.$$

Le m^{me} son partiel de la corde fera donc encore défaut, toutes les fois que l'ébranlement aura lieu dans un point nodal. D'ailleurs les harmoniques présentent encore plus de force relativement au son fondamental que pour les cordes pincées, parce que la valeur de A_m dans l'équation (3) est divisée par m^2, et celle de B_m dans l'équation (10), seulement par m. C'est ce que montre d'ailleurs l'expérience, si l'on frappe des cordes avec la tranche aiguë d'une petite verge métallique.

Dans le piano, la discontinuité du mouvement de la corde est diminuée, parce que les marteaux sont recouverts de coussins élastiques. Les harmoniques aigus sont notablement diminués, parce que le mouvement se communique non plus à un seul point, mais à une portion plus considérable, et non pas instantanément comme dans la secousse au moyen d'un corps dur. Le coussin élastique cède plutôt à la première secousse, et s'aplatit de manière que, pendant le temps où le marteau repose sur la corde, le mouvement peut déjà s'étendre à une portion plus longue que celle immédiatement en contact avec le marteau. Il serait assez compliqué d'analyser exactement le mouvement de la corde qui se produit après l'ébranlement provoqué par un marteau de piano. Mais, si nous considérons que les cordes se déplacent relativement peu, tandis que le coussin élastique et mou du marteau est très-flexible, et peut être notablement comprimé, nous pouvons, pour simplifier la théorie mathématique, attribuer à la pression exercée sur la corde par le marteau pendant la secousse, la valeur qu'elle aurait, si le marteau frappait sur un corps entièrement solide et parfaitement inflexible. D'après cela, posons la pression du marteau

$$F = A \sin mt$$

pour les valeurs du temps t comprises entre 0 et $\frac{\pi}{m}$. Cette dernière valeur $\frac{\pi}{m}$ est la longueur du temps pendant lequel le marteau repose sur la corde. Il la quitte ensuite et la laisse vibrer librement. La valeur m est directement proportionnelle à l'élasticité du marteau, et inversement proportionnelle à son poids.

Déterminons d'abord le mouvement de la corde pendant la période du contact, de $t = 0$ à $t = \frac{\pi}{m}$. Appelons x_0 la valeur x au point d'ébranlement. Nous désignerons par y_1 les valeurs de y pour les parties de la corde où l'on a $n < x_0$, par y^1 celles où l'on a $x > x_0$. Au point d'ébranlement même, la pression de la corde contre le marteau est égale à celle exercée par le marteau. On peut calculer cette pression de la corde comme dans l'équation ($6a$), supplément III, et nons obtenons l'équation

$$F = A \sin mt = S \left(\frac{dy_1}{dx} - \frac{dy^1}{dx}\right) \qquad (11)$$

Des deux côtés du point frappé partent des ondes. Donc y_1 doit avoir la forme

$$y_1 = \varphi(x - x_0 + at)$$

pour les valeurs de t telles que l'on ait $0 < t < \frac{\pi}{m}$ et $x_0 > x > x_0 - at$, et

$$y^1 = \varphi(x_0 - x + at)$$

par les mêmes valeurs de t et les valeurs de x pour lesquelles $x_0 < x < x_0 + at$. En désignant par φ' la dérivée de la fonction φ, on tire de l'équation (11)

$$F = A \sin mt = 2S\varphi'(at) \qquad (11\ a),$$

ce qui donne en intégrant par rapport à t

$$C - \frac{A}{m} \cos mt = \frac{2S}{a} \varphi(at)$$

d'où l'on tire, en déterminant la constante de manière que pour $x = x_0 \pm at$, y_1 et y^1 deviennent successivement nuls :

$$y_1 = \frac{aA}{2mS} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{m}{a} (x - x_0) + mt \right] \right\},$$
$$y^1 = \frac{aA}{2mS} \left\{ 1 - \cos \left[\frac{m}{a} (x_0 - x) + mt \right] \right\}.$$

Le mouvement de la corde est ainsi déterminé pour le temps où $0 < t < \frac{\pi}{m}$, et pour le cas où les deux ondes, en se propageant, ne viennent pas se heurter à l'une des extrémités de la corde. S'il en était ainsi, les ondes s'y réfléchiraient.

Quand at est devenu plus grand que $\frac{\pi}{m}$, F devient nulle, et il résulte alors de l'équation (11 a) que

$$\varphi'(at) = 0 \quad \text{d'où} \quad \varphi(at) = \text{const pour } at > \frac{\pi}{m}.$$

Donc y_1 et y^1 restent tous deux égaux à $\frac{aA}{mS}$, pour tous les points de la corde que l'on a déjà rencontrés, jusqu'à ce que les portions des ondes, réfléchies aux extrémités de la corde, arrivent aux points considérés.

Pour introduire convenablement dans le calcul l'influence des extrémités de la corde, il faut supposer que celle-ci est infiniment longue, et que tous les points, distants du point d'attaque x_0 d'un multiple de $2\,l$, sont attaqués simultanément et de la même manière, en sorte que chacun d'eux soit le point de départ d'ondes analogues à celles qui émanent d'x_0. Imaginons, en outre, aux points où $x = -x_0 \pm 2nl$ un ébranlement égal à celui de x_0 (n étant un nombre entier quelconque), se produisant avec la même force, mais dans un sens opposé, de manière que de ces points émanent des ondes égales à celles de x_0, mais présentant des hauteurs négatives. Il coïncide alors toujours aux extrémités de la corde deux valeurs égales mais dirigées en sens inverse des ondes

positives et négatives; ces extrémités sont donc parfaitement en repos, et, pour la portion réellement existante de la corde supposée infinie, entre ses deux extrémités, toutes les condiditions nécessaires se trouvent remplies.

Du moment où le marteau abandonne la corde, le mouvement de celle-ci peut être considéré comme la marche des deux systèmes d'ondes se propageant en avant (c'est-à-dire dans le sens des x positifs), et en arrière (dans le sens des x négatifs). Mais de ces systèmes d'ondes nous n'avons trouvé d'abord que des portions isolées, détachées, correspondant aux portions de la corde voisines du point d'ébranlement; nous devons encore compléter suffisamment les ondes pour obtenir un système continu d'ondes se propageant en avant et en arrière.

Si l'on s'avance sur la corde dans le sens des x positifs, y devient nul avant qu'on ait rencontré une onde positive rétrograde, puis il croît jusqu'à $\frac{a\text{A}}{m\text{S}}$, valeur qu'il a aux points d'attaque positifs. Si l'on dépasse le point d'attaque et les ondes qui en émanent en avant, on retrouve des valeurs de y qui sont nulles et descendent jusqu'à $-\frac{a\text{A}}{m\text{S}}$, dès qu'on dépasse les premières ondes négatives rétrogrades. Cette valeur $-\frac{\text{A}}{m\text{S}}$ est celle que prend y au premier point négatif. Pour relier maintenant entre elles les ondes rétrogrades positives et négatives, il faut supposer, entre une onde positive et l'onde négative qui suit, la quantité $+\frac{a\text{A}}{m\text{S}}$ ajoutée aux valeurs de y_1, en sorte que la hauteur d'onde conserve la valeur qu'elle a déjà en x_0, jusqu'à l'endroit où commence l'onde négative correspondante. La hauteur d'onde devient donc $\frac{a\text{A}}{2m\text{S}}-y_1$ et descend jusqu'à zéro. De même, il faut, entre un point d'attaque négatif et le point d'attaque positif qui lui succède immédiatement, supposer la quantité $-\frac{a\text{A}}{m\text{S}}$ ajoutée à la hauteur des ondes qui se propagent en avant. De cette manière les ondes rétrogrades sont partout positives, les autres partout négatives, et les deux systèmes ondulatoires sont en même temps disposés de façon à produire, dans leur propagation, l'espèce de mouvement que nous avons trouvé pour les cordes, après que le marteau les a abandonnées.

Nous avons maintenant à mettre ce système d'ondes sous la forme d'une somme d'ondes simples. La longueur d'onde est $2l$, parce que des points d'attaque exactement analogues se retrouvent, séparés par cette distance. Prenons les ondes positives rétrogrades au temps $t=\frac{\pi}{m}$, on a

$$1^\circ \quad \text{de } x=0 \quad \text{à} \quad x=x_0-\frac{a\pi}{m},$$
$$y_1=0;$$

2° de $x = x_0 - \frac{a\pi}{m}$ à $x = x_0$,

$$y_1 = \frac{aA}{2mS}\left\{1 + \cos\left[\frac{m}{a}(x - x_0)\right]\right\};$$

3° de $x = x_0$ à $x = 2l - x_0 - \frac{a\pi}{m}$,

$$y_1 = \frac{aA}{mS};$$

4° de $x = 2l - x_0 - \frac{a\pi}{m}$ à $x = 2l - x_0$,

$$y_1 = \frac{aA}{2mS}\left\{1 - \cos\left[\frac{m}{a}(2l - x_0 - x)\right]\right\};$$

5° de $x = 2l - x_0$ à $x = 2l$,

$$y_1 = 0.$$

D'après cela, posons

$$\begin{aligned} y_1 = A_0 &+ A_1 \cos\frac{\pi}{l}(x + c) + A_2 \cos\frac{2\pi}{l}(x + c) + A_3 \cos\frac{3\pi}{l}(x + c) + \text{etc.} \\ &+ B_1 \sin\frac{\pi}{l}(x + c) + B_2 \sin\frac{2\pi}{l}(x + c) + B_3 \cos\frac{3\pi}{l}(x + c) + \text{etc.} \quad (12) \end{aligned}$$

on a

$$\int_0^{2l} y \cos\frac{n\pi}{l}(x + c)dx = A_n l,$$

$$\int_0^{2l} y \sin\frac{n\pi}{l}(x + c)dx = B\ l.$$

En faisant $c = \frac{a\pi}{2m}$, tous les B s'annulent parce que y a la même valeur pour $\frac{a\pi}{2m} + \xi$ et $\frac{a\pi}{2m} - \xi$, et on peut choisir arbitrairement les limites de l'intégrale, pourvu qu'elles soient séparées l'une de l'autre par une distance de $2l$. En revanche, on a

$$A_n = -\frac{2aAml^2}{Sn\pi(n^2\pi^2a^2 - m^2l^2)} \sin\left(\frac{n\pi}{l}x_0\right)\cos\left(\frac{n\pi}{l}\cdot\frac{a\pi}{2m}\right). \quad (12\ a)$$

Cette équation donne les amplitudes A_n des harmoniques du son de la corde frappée. Si l'attaque se fait en un point nodal du n^{me} son partiel, le facteur $\sin\frac{n\pi}{l}x_0$ devient nul, et il manque par conséquent tous les sons partiels qui ont un nœud au point d'attaque. C'est d'après cette équation qu'a été calculé le tableau donné à la page 111.

Si on veut déterminer d'une manière complète le mouvement de la corde, on n'a qu'à changer dans l'équation (2) pour y_1, x en $x + at$. L'expression correspondante de y^1 devient alors

$$y^1 = -A_0 - A_1 \cos\frac{\pi}{l}(x + at - c) - A_2 \cos\frac{2\pi}{l}(x - at - c) + \text{etc.}$$

et définitivement

$$y = y_1 + y^1 = 2A_1 \cos\frac{\pi}{l}x \cos\frac{\pi}{l}(at + c) + 2A_2 \cos\frac{2\pi}{l}x \cos\frac{2\pi}{l}(at + c) + \text{etc.},$$

ce qui résout le problème.

Si l'on fait croître m indéfiniment, c'est-à-dire si le marteau devient tout à fait dur, l'expression de A_n tirée de l'équation (12 a) se change en celle de B_m dans l'équation (10).

Dans (10) l'm est identique avec l'n de (12 a).

Si m n'est pas infini, les coefficients A_n diminuent, pour les valeurs croissantes de n, comme $\frac{1}{n^3}$; si m est infini, comme $\frac{1}{n}$; dans le cas où la corde est tirée de côté, comme dans la harpe, ces coefficients diminuent comme $\frac{1}{n^2}$. Cela est d'accord avec le théorème que Stokes (1) a établi, touchant l'influence de la discontinuité d'une fonction développée suivant la série de Fourier sur la grandeur des termes d'un numéro d'ordre élevé. Si y est la fonction qui doit être développée en série :

$$y = A_0 + A_1 \sin (mx + c_1) + A_2 \sin (2mn + c_2), \text{ etc.}$$

le coefficient A_n, pour les valeurs très-grandes de n est :

1° De l'ordre de $\frac{1}{n}$, si y lui-même éprouve une brusque variation ;

2° De l'ordre de $\frac{1}{n^2}$, si la dérivée $\frac{dy}{dx}$ varie brusquement ;

3° De l'ordre de $\frac{1}{n^3}$, si la discontinuité ne commence qu'à $\frac{d^2y}{dx^2}$;

4° Tout au plus de l'ordre e^{-n}, si toutes les dérivées et la fonction elle-même sont continues.

Il en résulte, par conséquent, pour les sons musicaux, la loi plusieurs fois invoquée dans le texte de l'ouvrage, à savoir qu'en général les harmoniques aigus sont d'autant plus forts, que le mouvement correspondant du corps sonore est plus discontinu.

SUPPLÉMENT V

ANALYSE DU MOUVEMENT DES CORDES DE VIOLON.

Page 113.

En admettant que la lentille du microscope à vibrations vibre horizontalement, et le point lumineux observé verticalement, on voit se former des courbes de vibrations analogues à celles représentées dans la figure 23, p. 116. En désignant par y les coordonnées verticales, par x, les coordonnées horizontales, y est directement proportionnel aux élongations du point vibrant, et x, à celles de la lentille vibrante. Cette dernière exécute un mouvement simple pendulaire ; soient donc n, le nombre de ses vibrations et t le temps, on a en général

$$x = A \sin (2\pi nt + c)$$

où A et c sont des constantes.

(1) Cambridge, *Transactions*, VIII, 533-584.

Si maintenant le point vibrant fait aussi n vibrations, x et y sont tous deux périodiques et ont la même durée de période ; à l'expiration de chacune de ces périodes, x et y reprennent par conséquent les mêmes valeurs, et le point vibrant observé se retrouve par suite exactement à la même place qu'au commencement de la période. Cela est vrai pour chacun des points de la courbe, et pour chaque répétition du mouvement vibratoire, en sorte que la courbe apparaît comme immobile.

Prenons une courbe de vibration de même nature que celles représentées précédemment dans les figures 5, 6, 7, 8, 9, 10 et dont les abscisses horizontales sont directement proportionnelles aux temps ; supposons-la enroulée autour d'un cylindre dont la circonférence soit égale à une période de la courbe en question, en sorte que le temps se mesure sur la circonférence du cylindre ; en appelant x la distance à un plan passant par l'axe du cylindre, on a encore ici

$$x = A \sin (2\pi nt + c)$$

où $A \sin c$ représente la valeur de x pour $t = 0$ et A le rayon du cylindre. Si donc la courbe tracée sur le cylindre est vue par un œil infiniment éloigné, placé sur la ligne définie par $x = 0$, $y = 0$, la courbe prend exactement la même apparence que dans le microscope à vibrations.

Si la période n'est pas exactement la même pour x et pour y, si, par exemple, y fait n vibrations, et si x fait $n + \Delta n$, Δn désignant une quantité très-petite, on peut écrire de la manière suivante l'expression de x :

$$x = A \sin [2\pi nt + (c + 2\pi t \, \Delta \, n)].$$

La constante de tout à l'heure C croît ici lentement. Quant à c, il désigne l'angle formé par le plan $x = 0$ et le point du dessin, pour lequel $t = 0$. Dans ce cas, par conséquent, le cylindre, sur lequel nous avons supposé le dessin enroulé, semble tourner sur son axe.

Comme une quantité périodique de période π, peut aussi être considérée comme ayant la période 2π, 3π, $a\pi$, a étant un nombre entier quelconque, les considérations précédentes s'appliquent aussi au cas où la période de y est une partie aliquote de celle de x, ou inversement, ou bien encore au cas où les deux périodes sont des aliquotes d'une troisième, c'est-à-dire, lorsque les sons du diapason et du corps observé sont dans un rapport de consonnance quelconque. Il faut seulement remarquer que la période commune de vibrations ne doit pas être assez longue pour que, pendant sa durée, l'impression lumineuse puisse s'éteindre dans l'œil.

Il résulte des observations, que le mouvement principal de tous les points de la corde est successivement ascensionnel et descendant, la vitesse ascendante étant constante ainsi que la vitesse descendante, mais cette dernière ayant une valeur différente. Quand l'archet prend

la corde en un des nœuds d'un des harmoniques aigus, le mouvement se produit exactement comme il vient d'être décrit à tous les nœuds du même son. Aux autres points de la corde, on peut distinguer encore dans la courbe de la vibration de petits zigzags, mais qui laissent nettement reconnaître la forme du mouvement général décrit.

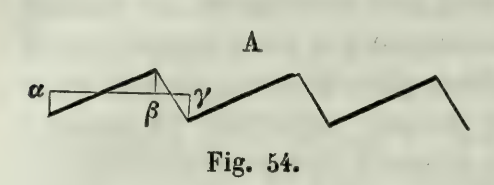


Fig. 54.

Dans la figure 54 comptons le temps à partir de l'abscisse du point α, en sorte que, pour α, $t = 0$; posons, en outre, pour le point β, $t = \tau$, et pour le point γ, $t = T$, cette dernière lettre désignant la durée d'une période entière; la valeur de y devient alors :

$$\left.\begin{array}{l} \text{de } t = 0 \text{ à } t = \tau, \quad y = ft + h; \\ \text{de } t = \tau \text{ à } t = T, \quad y = g(T - t) + h. \end{array}\right\} \quad (1)$$

d'où il résulte, pour $t = \tau$

$$f\tau = g(T - \tau).$$

En supposant maintenant y développé suivant la série de Fourier :

$$y = A_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + A_2 \sin \frac{4\pi t}{T} + A_3 \sin \frac{6\pi t}{T} + \text{etc.}$$
$$+ B_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + B_2 \cos \frac{4\pi t}{T} + B_3 \cos \frac{6\pi t}{T} + \text{etc.},$$

on obtient par intégration

$$A_n \int_0^T \sin^2 \frac{2n\pi t}{T}\, dt = \int_0^T y \sin \frac{2n\pi t}{T}\, dt;$$
$$B_n \int_0^T \cos 2 \frac{2n\pi t}{T}\, dt = \int_0^T y \cos \frac{2n\pi t}{T}\, dt;$$

ce qui donne les valeurs suivantes de A_n et de B_n

$$A_n = \frac{(g+f)T}{2n^2\pi^2} \sin \frac{2n\pi\tau}{T};$$
$$B_n = -\frac{(g+f)T}{2n^2\pi^2} \left\{ 1 - \cos \frac{2n\pi\tau}{T} \right\},$$

et y prend la forme

$$y = \frac{(g+f)T}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left\{ \frac{1}{n^2} \sin \frac{\pi n \tau}{T} \sin \frac{2\pi n}{T}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right\}. \quad (2)$$

Dans l'équation (2), y ne représente que la distance d'un point déterminé de la corde à sa position d'équilibre. Si x désigne la distance de ce point à l'extrémité de la corde, et L la longueur de cette dernière, la forme générale de y est, comme dans l'équation (1 b), supplément II :

$$y = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left\{ Cn \sin \frac{n\pi x}{L} \sin \frac{2\pi n}{T}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right\}$$

$$+ \sum \left\{ Dn \sin \left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos \frac{2\pi n}{T}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right\}. \qquad (3)$$

La comparaison des équations (2) et (3) montre immédiatement que tous les D_n sont nuls et que

$$C_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) = \frac{g+f}{\pi^2} \cdot \frac{T}{n^2} \sin \frac{n\pi\tau}{T}. \qquad (3a)$$

Ici $(g+f)$ et τ sont dépendants de x, mais non de n. En prenant les équations pour $n = 1$ et $n = 2$ et divisant membre à membre, on a :

$$\frac{C_2}{C_1} \cos \frac{\pi x}{L} = \frac{1}{4} \cos \pi \frac{\tau}{T}.$$

Il s'ensuit que, pour $x = \frac{L}{2}$, conformément à l'observation, $\tau = \frac{T}{2}$. Si, au contraire, $x = 0$, d'après l'observation, τ est aussi nul ; il en résulte que

$$C_2 = \frac{1}{4} C_1$$

$$\frac{x}{L} = \frac{\tau}{T}$$

et, comme conséquence, que $(g+f)$ est indépendant de x. Appelons p l'amplitude de la vibration du point x de la corde, on a

$$f\tau = g(T-\tau) = 2p$$

$$(g+f) = \frac{2p}{\tau} + \frac{2p}{T-\tau} = \frac{2pT}{\tau(T-\tau)} = \frac{2pL^2}{Tx(L-x)}$$

et comme $g + f$ est indépendant de x, on doit avoir

$$p = 4P\frac{x(L-x)}{L^2}$$

où P désigne l'amplitude au milieu de la corde.

De l'équation (3 *b*) il résulte que les sections $\alpha\beta$ et $\beta\gamma$ de la courbe de vibration (*fig*. 24 A), doivent se comporter comme les portions correspondantes de la corde, des deux côtés du point observé. Il s'ensuit en définitive l'équation

$$y = \frac{8P}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left\{ \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi x}{L} \sin \frac{2xn}{T}\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right\} \qquad (3\ c)$$

comme expression plus complète du mouvement de la corde.

En posant $t - \frac{\tau}{2} = 0$, y devient nul pour toutes les valeurs de x, et, par conséquent, tous les points de la corde repassent en même temps par la position d'équilibre. Ensuite, on a la vitesse f du point x

$$f = \frac{2p}{\tau} = \frac{8P(L-x)}{LT}.$$

Mais cette vitesse ne doit durer que pendant le temps τ, $\tau = \frac{Tx}{L}$. Au bout du temps t, on a donc

$$y = ft = \frac{8P}{LT} \cdot (L - x)t \tag{4}$$

tant que

$$t < T\frac{x}{L}.$$

et par conséquent

$$y < \frac{8P}{L^2} x(L - x).$$

De là, y revient avec la vitesse $g = \frac{2p}{T-\tau} = \frac{8Px}{LT}$. Au bout du temps $t = \tau + t_1$, on a donc

$$y = \frac{8P}{L^2} x(L - x) - \frac{8Px}{LT} t_1;$$

et comme

$$L - x = \frac{T - \tau}{T} L,$$

on a

$$\begin{aligned} y &= \frac{8Px}{LT} \left\{ T - (\tau + t_1) \right\} \\ &= \frac{8Px}{LT} (T - t). \end{aligned} \tag{4 a}$$

L'écartement de la position d'équilibre est donc donné pour l'une des portions de la corde par l'équation (4) et pour l'autre par (4 *a*). Les deux équations donnent pour la forme de la corde une ligne droite qui passe par le point $x = L$ (4), ou par le point $x = 0$ (4 *a*). Ce sont là les deux extrémités de la corde. Le point d'intersection est donné par la condition

$$y = \frac{8P}{LT} (L - x)t = \frac{8P}{LT} x(T - t).$$

D'où

$$\begin{aligned} (L - x)t &= x(T - t) \\ Lt &= xT \end{aligned}$$

L'abscisse x du point d'intersection croît donc proportionnellement au temps. Ce point, qui est en même temps le plus éloigné de la position d'équilibre, va donc avec une vitesse constante d'une extrémité à l'autre de la corde, en restant lui-même pendant ce temps-là sur un arc de parabole, car, pour lui,

$$y = p = \frac{8P}{L^2} x(L - x).$$

On peut donc décrire brièvement le mouvement de la corde en disant que, dans la figure 55, le pied *d* de l'abscisse du sommet de la corde va et vient sur la ligne *ab* avec une vitesse constante, tandis que le sommet lui-même parcourt l'un après l'autre les deux arcs de parabole ac_1b et bc_2a, la corde elle-même étant tendue suivant les deux droites ac_1 et bc_1 ou ac_2 et bc_2.

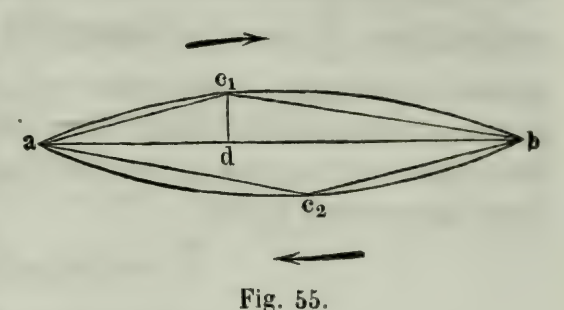


Fig. 55.

Les petits zigzags de la courbe de vibration qu'on observe si souvent, proviennent le plus souvent de ce que les sons partiels qui ont des nœuds à la place où frotte l'archet ou dans le voisinage, et qui, par conséquent, ne peuvent que peu ou point sortir sous l'archet, sont étouffés et font défaut. Si l'archet rencontre un des nœuds voisins du chevalet du m^{me} harmonique, les vibrations de cet harmonique, du $2m^{me}$, du $3m^{me}$, etc., n'ont aucune influence sur le mouvement du point ébranlé par l'archet, et ces harmoniques peuvent, par conséquent, disparaître sans que l'action de l'archet sur la corde en soit modifiée : c'est ainsi que s'expliquent en réalité, les irrégularités observées. Quant à ce qui arrive lorsque l'archet saisit la corde entre deux nœuds, je n'ai pu le déterminer par expérience.

SUPPLÉMENT VI

INFLUENCE DE LA RÉSONNANCE DANS LES TUYAUX A ANCHE.

Page 134.

Pour les tuyaux cylindriques j'ai développé mathématiquement les lois de la résonnance dans ma *Théorie des vibrations de l'air dans les tuyaux ouverts* (*). On peut appliquer aux tuyaux à anche l'exemple rapporté dans le § 7 de ce mémoire, où on suppose donné le mouvement au fond du tuyau. Soit Vdt le volume d'air qui entre dans le tuyau à anche pendant le temps infiniment petit dt, cette quantité étant périodique peut être représentée au moyen du développement de Fourier, de la manière suivante :

$$Vdt = C_0 + C_1 \cos(2\pi nt + T_1) + C_2 \cos(4\pi nt + T_2) + \text{etc}\ldots \qquad (1)$$

Il faut déterminer séparément la résonnance de chaque terme, parce que les mouvements vibratoires correspondant aux harmoniques isolés se superposent sans agir les uns sur les autres. Les équations (15) et (12 *b*)

(*) *Journal für reine und angewandte Mathematik*, Bd. LVII.

du mémoire dont il s'agit nous montrent que si nous désignons par l la longueur du tuyau, par Q sa section, par $l+\alpha$ la longueur réduite du tuyau (la différence α est dans les tuyaux cylindriques égale au rayon multiplié par $\frac{\pi}{4}$), par K la quantité $\frac{2\pi}{\lambda}$, étant la longueur d'onde, et si nous posons le potentiel, c'est-à-dire la fonction dont les dérivées par rapport aux coordonnées donnent les composantes de la vitesse (fonction des vitesses de Lagrange), de l'onde dans l'air libre pour le son de an vibrations par seconde égal à

$$\frac{M_a}{r}\cos\left(akr - 2\pi ant + c\right),$$

où r désigne la distance du centre à l'embouchure, on a

$$M_a = \frac{C_a}{\sqrt{4\pi^2 \cos^2 ak(l+\alpha) + a^4k^4Q^2 \sin^2 akl}}.$$

Comme la quantité K^2Q doit toujours être supposée très-petite pour que notre théorie soit applicable, dans les cas où $l+\alpha$ n'est pas un multiple impair d'un quart de longueur d'onde, cette équation se rapproche de

$$M_a = \frac{C_a}{2\pi \cos ak(l+\alpha)}.$$

La résonnance est donc la plus faible lorsque la longueur réduite du tuyau est un multiple pair d'un quart de longueur d'onde, et devient plus forte lorsqu'elle se rapproche davantage d'un multiple impair de cette longueur. Quand elle l'atteint, la formule complète donne,

$$M_a = \frac{C_a}{a^2k^2Q}.$$

Le maximum de la résonnance est donc d'autant plus grand que la longueur d'onde du son considéré est plus grande, et que la section est plus petite. Plus la section est petite et plus se resserrent les limites de hauteur entre lesquelles la forte résonnance peut se produire ; pour une forte section, au contraire, la forte résonnance s'étend sur une portion plus considérable de la gamme.

Pour les corps creux d'une forme différente et munis d'étroites embouchures, on peut arriver à des équations analogues au moyen des lois établies dans le § 10 du même mémoire.

Comme la condition de forte résonnance est que $\cos ak\,(l+\alpha) = 0$, dans les tuyaux cylindriques (clarinettes) les sons partiels impairs sont seuls renforcés en même temps que le son fondamental. — Dans l'intérieur de tuyaux coniques nous pouvons poser le potentiel du mouvement pour le son n égal à

$$V = \frac{A}{r}\sin\left(kr + c\right)\cos 2\pi nt,$$

où r désigne la distance au sommet du cône. Si une anche est adaptée

à la distance a du sommet, la longueur du tuyau étant l, et par suite $r = l + a$ pour l'extrémité ouverte, nous pouvons imposer comme condition limite pour l'extrémité libre ou au moins dans le voisinage, que la pression y soit égale à 0 ; c'est ce qui arrive si

$$\frac{dV}{dr} = -2\pi n \frac{A}{l+a} \sin[k(l+a)+c] \sin 2\pi nt = 0\,;$$

d'où

$$\sin[k(l+a)+c] = 0,$$

et nous pouvons poser

$$c = -k(l+a),$$
$$V = \frac{A}{r} \sin k(r-l-a)\cos(2\pi nt).$$

La plus forte résonnance correspond donc, comme dans les tuyaux cylindriques, aux sons qui présentent le minimum de vitesse à la place qu'occupe l'anche. Comme dans le développement de la vitesse à l'embouchure, équation (1), les coefficients Ca ont une valeur déterminée qui ne dépend que du mouvement de l'anche et des secousses imprimées à l'air, le coefficient A de la dernière équation doit devenir d'autant plus grand, que le courant d'air correspondant à l'embouchure du tuyau a une vitesse moindre. La vitesse grandit alors dans les autres parties du tuyau. Mais la vitesse des molécules d'air est

$$\frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2} \cos 2\pi nt\,[kr \cos k(r-l-a) - \sin k(r-l-a)].$$

Pour le maximum de la résonnance, il faut donc que, pour $r = a$,

$$kr = tg\,[k(r-l-a)]$$

où

$$ka = -tg(kl).$$

Si maintenant la quantité a, c'est-à-dire la distance de l'anche au sommet du cône, est très-petite, ka et $tgkl$ sont également très-petits et il en est de même de $(kl - \omega\pi)$, ω désignant un certain nombre entier. Nous pouvons alors développer la tangente suivant les puissances de l'arc et obtenir, en nous bornant au premier terme du développement :

$$ka = \omega\pi - kl,$$
$$k(a+l) = \omega\pi,$$

ou en posant $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$a + l = \frac{\omega\pi\lambda}{2}.$$

Il s'ensuit que les tuyaux coniques renforcent tous les sons, pour lesquels la longueur entière du cône comptée jusqu'à son sommet est un multiple de la longueur d'une demi-onde λ ; en supposant que la distance de l'anche au sommet du cône soit négligeable devant la longueur d'onde.

Par conséquent, si le son fondamental est renforcé par le tuyau, il en sera de même de tous les harmoniques pairs ou impairs, jusqu'à une hauteur où leurs longueurs d'onde ne sont plus très-grandes par rapport à la distance *a*.

SUPPLÉMENT VII

INSTRUCTIONS PRATIQUES POUR LES EXPÉRIENCES SUR LA COMPOSITION ARTIFICIELLE DES VOYELLES.

Page 156.

Pour obtenir de fortes vibrations des diapasons, il est nécessaire que les nombres de vibrations correspondent avec la plus grande précision aux rapports simples arithmétiques. Quand les diapasons ont été accordés par le constructeur, d'après l'oreille et le piano, aussi exactement que la chose est possible, on arrive ainsi à la précision plus grande exigée au moyen du courant électrique lui-même. On commence par relier le diapason interrupteur avec celui donnant le son fondamental, et on déplace la pince mobile *h* sur le premier (*fig.* 33, p. 55), jusqu'à ce qu'on obtienne l'unisson parfait où le son fondamental atteint le maximum d'intensité, ce qu'il est facile à l'œil aussi bien qu'à l'oreille d'apprécier. En effet, les vibrations de ce diapason le plus grave sont assez fortes, pour que l'amplitude à l'extrémité des branches atteigne 2 à 3 millimètres dans les circonstances favorables. Il faut remarquer aussi que si l'on approche de l'unisson sans l'atteindre, et qu'on fasse agir le courant électrique sur le diapason, on entend et on voit, au début de l'action, quelques battements qui disparaissent cependant quand l'appareil est arrivé à la marche normale.

Après avoir obtenu l'unisson entre l'interrupteur et le diapason du son fondamental, on intercale successivement dans le circuit les autres diapasons avec leur caisse de résonnance ouverte, et on en modifie le ton jusqu'à ce qu'ils donnent le maximum d'intensité du son sous l'influence du courant intermittent. On les accorde d'abord au moyen de la lime. On sait qu'on hausse les diapasons, en diminuant un peu les branches à leur extrémité, et qu'on les baisse en amincissant la base des branches. Mais tout cela doit se faire aussi régulièrement que possible sur les deux branches. Pour déterminer si le diapason est trop haut ou trop bas, on colle un peu de cire aux extrémités des branches, ce qui baisse le ton, et on observe si le son est renforcé ou affaibli. Dans le premier cas, le diapason est trop bas, dans le second, il est trop haut. Comme les changements de température et peut-être aussi d'autres circonstances exercent une petite influence sur le ton du diapason, j'ai préféré rendre un peu trop hauts, avec la lime, tous les diapasons aigus, et les ramener au ton véritable en collant aux extrémités des branches de

petites quantités de cire. La quantité de cire peut être facilement modifiée à volonté, ce qui permet de faire disparaître de petites altérations fortuites du ton. Pour les tuyaux de résonnance, il n'est pas nécessaire de les accorder avec cette précision ; lorsqu'en soufflant dedans, on obtient le même son que le diapason, l'accord est suffisant. S'ils sont trop bas, on peut y couler de la cire fondue, ce qui hausse le ton. S'ils sont trop hauts, il faut en rétrécir un peu l'orifice.

J'ai eu quelque peine à faire disparaître le bruit de l'étincelle à l'endroit de l'interruption du courant. J'ai d'abord intercalé un grand condensateur formé d'une planche recouverte d'une feuille d'étain, comme on en emploie dans les grands appareils d'induction électro-magnétiques. L'étincelle est alors affaiblie, mais seulement dans une certaine mesure. Je constatai qu'il n'était plus utile d'avoir un condensateur plus grand. Les deux surfaces du condensateur sont séparées par des feuilles minces de papier vernissé, dont l'une communique avec le diapason interrupteur, et l'autre avec le godet plein de mercure où plonge l'extrémité de la pointe de l'interrupteur. Après de nombreux essais infructueux, je finis par trouver que l'interposition d'un fil métallique très-long et très-mince entre les deux extrémités du circuit, à l'endroit de l'interruption, éteignait presque entièrement le bruit de l'étincelle sans nuire cependant à l'action du courant sur les diapasons. Le fil métallique ainsi interposé doit avoir une résistance de beaucoup supérieure à celle offerte par l'ensemble du circuit dans tous les électro-aimants. Alors il ne passe pas par ce fil une portion de courant qui puisse être prise en considération. D'abord, si le courant est établi et que le fil mince ferme seul le circuit de l'extra-courant, ce dernier le traverse. Pour que le fil lui-même ne donne point d'extra-courant, il ne doit pas être enroulé autour d'une bobine ; il faut au contraire qu'il soit tendu et replié sur une planchette, de manière que les deux portions voisines soient traversées par des courants de sens contraire. A la fin, j'ai vissé aux deux extrémités d'une planchette d'un pied de long, deux peines de caoutchouc dur, entre les dents desquels j'ai fait passer quatre-vingt-dix fois un mince fil de cuivre argenté, comme on en emploie pour broder les tissus de soie. On obtient ainsi une grande longueur (quatre-vingt-dix pieds) de ce fil, bien isolée et renfermée dans un espace relativement resserré, de manière qu'il ne se produit pas d'extra-courant appréciable. En effet, si, au moment de l'interruption du courant dans le fil, il s'y produisait un extra-courant, celui-ci aurait dans les électro-aimants et le circuit formé par le fil mince, une direction opposée à celle de l'extra-courant dans les électro-aimants, et ce dernier empêcherait en totalité ou en partie, la propagation à travers le fil mince.

Pour mettre les diapasons en mouvement, j'employais deux ou trois éléments de Grove. Les électro-aimants étaient rangés en deux séries, les uns à côtés des autres. La disposition générale est représentée en *schéma* (*fig.* 56). Les chiffres de 1 à 8 désignent les tuyaux de résonnance des diapasons, les lignes ponctués allant à m_1, m_2 et m_8, les fils qui

ôtent les couvercles des orifices des tuyaux : de a_1 à a_8, sont les électro-aimants qui mettent en mouvement les diapasons placés entre leurs branches ; *b* est le diapason interrupteur ; *f*, l'électro-aimant correspondant. Leur position respective a été un peu modifiée pour mettre mieux

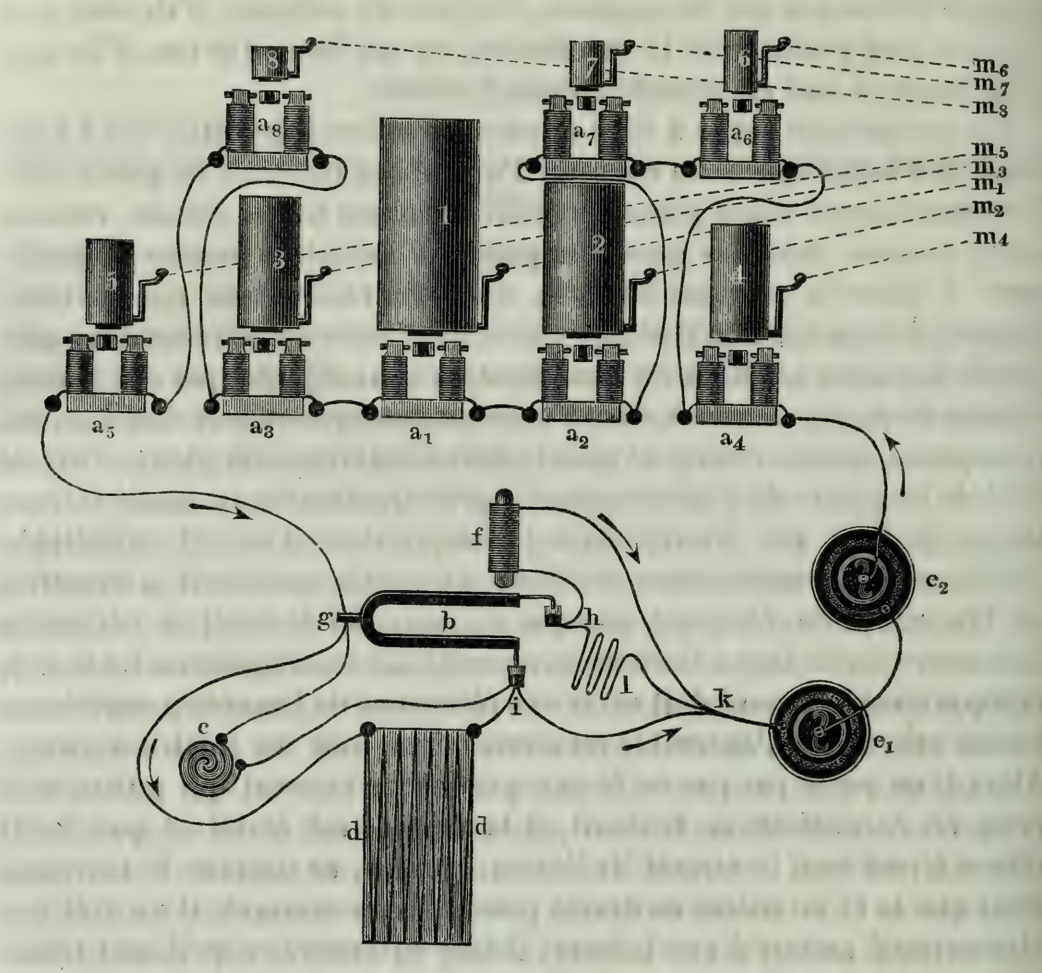


Fig. 56.

en évidence la marche du courant. Les éléments de la batterie électrique sont représentés par e_1 et e_2, le long fil amortisseur par *dd*, le condensateur, dont les plaques enroulées en spirale ne sont vues qu'en section, par *c*.

Le courant électrique va de e_2, à travers la série de tous les électro-aimants des diapasons, à la tige de l'interrupteur *g*. Il est quelquefois plus avantageux de disposer cette portion du circuit de manière à la partager en deux branches parallèles, à placer dans l'une les trois diapasons les plus hauts, les plus difficiles à ébranler, et dans l'autre branche, les cinq plus graves. Grâce à cette disposition, les trois premiers diapasons sont traversés par un courant plus fort que les cinq autres.

Le reste du circuit de *g* à l'autre pôle de la pile e_1, contient l'appareil interrupteur ; celui-ci est disposé de manière à ce que chaque vibration du diapason rétablisse deux fois le courant, quand la branche supérieure plonge dans le mercure du godet *h*, et quand la branche inférieure s'introduit dans le godet *i*. Si le circuit se ferme en *h*, le courant

va de *g* en *h* par la branche supérieure du diapason, puis en *k* et en *e*, à travers l'électro-aimant du diapason *f*. Entre *h* et *k* il est très-nécessaire d'intercaler encore une branche latérale *hlk*, de résistance moyenne, de manière à affaiblir assez le courant dans l'électro-aimant *f*, pour que le diapason *b* ne vibre pas trop fort. Les zigzags figurés en *l* représentent cette branche.

Les branches du diapason s'éloignent-elles l'une de l'autre, le courant sera interrompu en *h*, et, après une courte interruption, rétabli en *i*, en sorte que, maintenant il ira de *g* en *i* à travers la branche inférieure du diapason, et, de là, en e_1 en passant par K. Au moment de l'interruption en *h* ou en *i*, l'induction fait naître dans les huit électro-aimants des diapasons, des extra-courants énergiques, qui donneraient de brillantes et éclatantes étincelles aux points d'interruption, si l'électricité ne pouvait en partie s'accumuler dans le condensateur *c* pour le moment, en partie traverser le long fil amortisseur *dd*.

Ce dernier établit, comme on voit, une communication durable entre *g* et la pile, mais il est si mauvais conducteur, qu'il ne peut passer qu'une portion inappréciable du courant, excepté si, au moment de la fermeture du circuit, la grande force électro-motrice de l'extra-courant prend naissance.

Il faut adopter la disposition ici décrite lorsque le diapason 1 est l'octave supérieure du diapason *b*. S'il est au contraire à l'unisson de *b*, on ôte le fil *ik* et on amène en *h* les deux autres fils se terminant en *i*.

Si l'on veut retirer du courant certains diapasons isolés, on ferme dans ce but de petits commutateurs correspondant aux bobines des électro-aimants. Cette disposition est représentée (*fig.* 32, p. 154). Les boutons métalliques *h*, *h* sont reliés avec les vis de pression *g* où se termine le fil de l'électro-aimant. Si l'on abaisse le levier *i*, il vient appuyer avec quelque frottement sur le bouton *h*, et établit une communication beaucoup plus facile que le fil de l'électro-aimant ; il en résulte que le courant se transmet principalement de *h* en *h*, et qu'il n'en passe qu'une portion négligeable par le chemin beaucoup plus long du fil qui entoure les électro-aimants. — En ce qui concerne la théorie du mouvement des diapasons, il est d'abord évident que l'intensité du courant dans les électro-aimants doit être une fonction périodique du temps. La durée de la période est égale à la période d'une vibration du diapason interrupteur *b*. Soit *n* le nombre d'interruptions par seconde. L'intensité du courant dans les électro-aimants, et, par suite aussi, la valeur de la force exercée par eux sur les diapasons, sera de la forme :

$$A_0 + A_1 \cos(2\pi nt + c_1) + A_2 \cos(4\pi nt + c_2) + A_3 \cos(6\pi nt + c_3) + \text{etc.}$$

Le terme général de cette série, $A_m \cos(2\pi mnt + c_m)$, est propre à mettre en mouvement le diapason qui fait *mn* vibrations par seconde, et n'agit que faiblement sur les diapasons accordés à une autre hauteur.

SUPPLÉMENT VIII

PHASES DES ONDES QUI PRENNENT NAISSANCE DANS LA RÉSONNANCE.

Page 159.

Supposons qu'on approche un diapason de l'orifice d'un tuyau de résonnance et que l'oreille de l'auditeur se trouve à une distance du tuyau, très-grande par rapport aux dimensions de l'orifice. J'ai démontré (*), que si un point sonore se trouve au point B d'un espace en partie limité par des parois solides, et en partie libre, le mouvement sonore en un autre point A du même espace est le même comme intensité et comme phase, qu'il serait en B, si le point sonore était en A. Soient B la position du diapason (ou, plus exactement, de l'extrémité de l'une de ses branches), A celle de l'oreille. Le mouvement de l'air qui se produit lorsque le diapason se trouve près de l'orifice, n'est pas facile à bien déterminer, mais (p. 47 et 48 du mémoire cité) j'ai déterminé le mouvement pour le cas où le diapason est très-loin. Supposons donc le diapason transporté à la place de l'oreille en A, nous avons à déterminer le mouvement sonore au point B près de l'orifice. Ce mouvement se compose de deux parties dont l'une (son potentiel représenté dans le mémoire par Φ), correspond au mouvement qui se produirait si l'orifice du tuyau était fermé ; dans le cas présent, elle est trop petite pour pouvoir être perçue ; l'autre partie, désignée par Ψ, a, d'après les notations employées, dans l'espace libre, et à quelque distance de l'orifice, la valeur [p. 38 du mémoire, équation (12 h)] :

$$\Psi = -\frac{AQ}{2\pi} \cos \frac{(k\rho - 2\pi n t)}{\rho} \qquad (1)$$

(Q est la section du tuyau, ρ la distance du centre de l'orifice, n le nombre de vibrations, $\frac{2\pi}{k}$ la longueur d'onde). Le mouvement, à une distance infiniment petite r du point sonore A, est donné par l'équation :

$$\Phi = H \left\{ \frac{\cos [2\pi n t - c]}{r} \right\} \qquad (2)$$

et c'est, si nous désignons par r_1 la distance du point imaginaire sonore A au centre de l'orifice du tuyau, d'après (16 c) et (13 a) du mémoire cité :

$$-\operatorname{tang} (k r_1 + c) = \operatorname{tang} \tau_2 = -\frac{k^2 Q \sin kl \cos k\alpha}{2\pi \cos k(l + \alpha)} \qquad (2\ a)$$

(l la longueur du tuyau, α une constante qui dépend de la forme de l'orifice) et enfin on a (16 c, 13 a) la valeur désignée par I :

(*) *Journal für reine und angewandte Mathematik*, Bd. LVII, S. 1 *bis*, 72. *Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden.*

$$I = \frac{H2k \sin(kl)}{r_1} = \pm AQ \frac{k^2 \sin(kl)}{2\pi \sin \tau^2}$$

d'où il suit

$$I = H . \frac{2k \sin(kl)}{r_1} = \pm AQ \frac{k^2 \sin(kl)}{2\pi \sin \tau_2},$$

d'où il suit :

$$A = \pm H . \frac{4\pi \sin \tau_2}{kQr_1} \Big\} \qquad (3)$$

Le signe $\pm$ doit être déterminé de manière que les constantes A et H aient le même signe ; par suite τ_2 doit être compris entre 0 et π.

Ici l'intensité de la résonnance A est exprimée par l'intensité du point sonore H, la section du tuyau Q, la distance r_1 du point sonore à l'orifice et la quantité τ_2. La différence de phase entre les points A et B, est d'après l'équation (1), (2) et (2 *a*) :

$$\pi - k\rho + c = \pi - k\rho - kr_1 - \tau_2.$$

Mais la quantité $k\rho$, pour la distance du point B au centre de l'orifice que nous pouvons admettre, peut être considérée comme infiniment petite, en sorte que, dans l'affaiblissement du son que nous obtenons en éloignant le diapason de l'orifice du tuyau, la phase n'est pas modifiée d'une manière appréciable. Si nous faisons varier, au contraire, le ton du diapason, dans l'expression de la phase, il n'y aura de modifié que la quantité τ_2 qui dépend de kl d'après l'équation (2 *a*) ; et il correspond toujours aussi une variation dans la force de la résonnance, parce que, dans son expression, équation (3), sin τ_2 entre comme facteur. La plus forte résonnance se produit si $\sin \tau_2 = 1$, d'où $\tau_2 = \frac{\pi}{4}$. Appelons μ ce maximum de résonnance, on a

$$\mu = \frac{4\pi H}{kQr_1},$$

et, lorsque le tuyau est accordé dans d'autres tons, pourvu que la section reste la même

$$\sin \tau_2 = \frac{A}{\mu}.$$

Pour savoir si l'angle τ_2 doit être pris plus grand ou moindre qu'un droit, on cherche si, dans l'équation (2 *a*) la valeur de

$$\text{tang } \tau_2 = - \frac{k^2 Q \sin kl \cos k\alpha}{2\pi \cos k(l + \alpha)}$$

est positive ou négative. Comme k, Q et cos $k\alpha$ sont constamment positifs, la valeur de tang τ_2 dépend du facteur $\frac{\sin kl}{\cos k(l+\alpha)}$. Si $\cos k(l + \alpha) = 0$, c'est le maximum de la résonnance ; si $\sin kl = 0$, c'est le minimum. C'est donc $\tau_2 < \frac{\pi}{2}$, si en allongeant le tuyau on approche d'un mini-

mum de la résonnance, et $\tau_2 > \frac{\pi}{2}$ si l'on approche d'un maximum. Dans les applications, le tuyau est toujours assez voisin d'un maximum de résonnance, et par conséquent, $\tau_2 < \frac{\pi}{2}$ si le tuyau est accordé trop bas, et $\tau_2 > \frac{\pi}{2}$ s'il est accordé trop haut.

Si, en faussant le tuyau, on rend $A^2 = \frac{1}{2}\mu_2$, on modifie de $\frac{\pi}{2}$ la phase de la vibration. On peut donc toujours au moins estimer la modification opérée dans la phase, d'après la variation de force de la résonnance.

On trouve une loi semblable pour les phases des diapasons vibrants, comparées à celle du courant excitateur. Pour simplifier, je vais me borner ici à considérer un seul point vibrant, sans cesse ramené à sa position d'équilibre par une force de l'élasticité. Soit x la distance du point à sa position d'équilibre, soit a^2x cette force d'élasticité. Supposons de plus une force périodique comme celle produite dans nos expériences par le courant électrique, dont la valeur soit $A \sin nt$, et une force tendant à étendre les vibrations, dont la valeur, proportionnelle à la vitesse est égale à $-b_2 \frac{dx}{dt}$. Une force semblable se produit dans nos expériences, par le frottement et la résistance de l'air, mais surtout par l'action des courants induits des diapasons courants qui contribuent principalement à éteindre les vibrations. Si m désigne la masse du point vibrant, on a

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -a^2x - b^2\frac{dx}{dt} + A \sin nt. \qquad (4)$$

L'intégrale complète de cette équation est

$$x = \frac{A \sin \varepsilon}{b^2 n} \sin(nt - \varepsilon) + Be^{-\frac{bt}{2m}} \sin\left\{\frac{t}{m}\sqrt{a^2m - 1/4\, b^2} + c\right\} \qquad (4\ a)$$

où

$$\text{tang}\ \varepsilon = +\frac{b^2 n}{a^2 - mn^2}. \qquad (4\ b)$$

Le terme multiplié par B dans l'équation (4 *a*) n'exerce d'influence qu'au début du mouvement ; à cause du facteur $e^{-\frac{bt}{2m}}$ il décroît de plus en plus quand le temps croît de manière à disparaître définitivement. C'est de l'existence de ce terme au début du mouvement que proviennent les battements dont il est question dans le supplément VII, lorsque la quantité n diffère peu de

$$\frac{1}{m}\sqrt{a^2m - \frac{1}{4}b^2}.$$

Le terme de l'équation (4 *a*) multiplié par A correspond au contraire à la vibration durable du point matériel. La puissance vive i^2 de ce mouvement est égale au maximum de $\frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt}\right)^2$, c'est-à-dire

$$i^2 = \frac{mA^2 \sin^2 \varepsilon}{2b^4}. \tag{5}$$

Si maintenant on fait varier la hauteur du son excitateur, c'est-à-dire n, i^2 atteint son maximum que nous désignerons par I^2, quand

$$\sin^2 \varepsilon = 1 \quad \text{ou tang } \varepsilon = \pm \infty ;$$

d'où

$$I^2 = \frac{mA^2}{2b^4}.$$

Nous pouvons, par conséquent, écrire

$$i^2 = I^2 \sin^2 \varepsilon. \tag{5 a}$$

La même quantité ε détermine donc dans l'équation (4 *a*) la différence de phase entre les élongations périodiquement variables x du point matériel, et les valeurs variables de la force, comme dans l'équation (5 *a*) l'intensité de la résonnance.

La condition que tang $\varepsilon = \pm \infty$ sera remplie, si

$$a^2 = mn^2.$$

Désignons donc par N la valeur de n qui correspond au maximum de la vibration par influence, on a

$$N^2 = \frac{a^2}{m}. \tag{5 b}$$

Ce son *de plus forte résonnance* est égal à celui que rendrait le point matériel considéré, s'il entrait en vibration sous la seule influence de la force d'élasticité, sans frottement ni ébranlement étrangers. Aussi diffère-t-il un peu du *son propre* du corps, celui qu'il rend sous l'influence du frottement et de la résistance de l'air, dont la hauteur ν est donnée dans le second terme de l'équation (4 *a*) :

$$\nu = \frac{1}{m} \sqrt{a^2 m - \frac{1}{4} b^4}.$$

Si $b = 0$, c'est-à-dire si le frottement et la résistance de l'air s'évanouissent, on a

$$\nu^2 = \frac{a^2}{m} = N^2.$$

Maintenant dans toutes les circonstances de la pratique où nous ob-

servons le phénomène de la vibration par influence, b est infiniment petit, en sorte que la différence entre le son propre du corps et le son de plus forte résonnance peut être négligée comme elle l'a été dans le texte de l'ouvrage. L'équation (4 b) devient par la substitution de N

$$\text{tang}\ \varepsilon = \frac{b^2 n}{m(N^2 - n^2)} \cdot \qquad (5\ c)$$

SUPPLÉMENT IX

RELATION ENTRE L'INTENSITÉ DE LA VIBRATION PAR INFLUENCE ET LE TEMPS QUE LE SON MET A S'ÉTEINDRE.

Page 179.

Nous pouvons conserver les notations adoptées dans le supplément VIII pour le mouvement d'une masse ramenée à sa position d'équilibre par une force d'élasticité. Si une masse de ce genre est ébranlée par une force périodique extérieure, son mouvement est donné par l'équation (4 a). En supposant nulle l'intensité A de cette force, l'équation se réduit à

$$x = \text{B}e^{-\frac{bt}{2m}} \sin (\nu t + c)$$

où

$$\nu = \frac{1}{m} \sqrt{a^2 m - \frac{1}{4} b^2}.$$

La valeur de x décroît de plus en plus à cause du facteur qui contient t en exposant. Mesurons t, comme dans le texte, d'après le nombre des vibrations du son de plus forte résonnance et posons à cet effet

$$\text{T} = \frac{\text{N}}{2\pi}\, t$$

$$\beta = \frac{\pi b^2}{\text{N}m} = \pi \left(\frac{\text{N}}{n} - \frac{n}{\text{N}}\right) \text{tang}\ \varepsilon \cdot \qquad (6)$$

Si nous désignons par L la force vive des vibrations au temps $t = 0$ et par l, celle au temps t, on a

$$\text{L} = \text{B}^2\nu^2$$

$$l = \text{B}^2\nu^2 e^{-2\beta\text{T}}$$

d'où

$$\frac{\text{L}}{l} = e^{-2\beta\text{T}}$$

et

$$\text{T} = \frac{1}{2\beta} \log \text{nat.} \left(\frac{\text{L}}{l}\right) \qquad (6\ a)$$

Dans le tableau, p. 179, on a supposé $\frac{\text{L}}{l} = \frac{10}{1}$ et calculé d'après cela

la valeur de T après avoir préalablement déterminé la valeur de β au moyen de l'équation (6). Mais, dans cette dernière, on a posé $\sin^2 \varepsilon = \frac{1}{10}$, ce qui correspond à la condition que l'intensité du son rendu par le corps vibrant par influence atteigne le $\frac{1}{10}$ de son maximum, et pour le rapport $\frac{N}{n}$ on a mis les rapports numériques correspondant aux intervalles donnés dans la première colonne du tableau. C'est ainsi qu'on a calculé la valeur de β.

Nous pouvons écrire l'équation (4 *b*) du supplément VIII :

$$\tang \varepsilon = \frac{b^2}{mN\left(\frac{N}{n} - \frac{n}{N}\right)} = \frac{\beta}{\pi\left(\frac{N}{n} - \frac{n}{N}\right)}.$$

Dans cette équation, N qui donne le son de plus forte résonnance, b^2 qui détermine l'intensité du frottement et la masse m peuvent varier pour les différentes fibres de Corti. Il faut donc, pour appliquer à l'oreille les résultats précédents, considérer b^2 et m comme des fonctions de N. Comme le degré de dureté des petits intervalles dissonnants est sensiblement le même dans toute la gamme pour les mêmes notes, on peut admettre que, pour les valeurs égales de $\frac{N}{n}$, la quantité $\tang \varepsilon$ reste à peu près constante, et, par suite, que la quantité $\frac{b^2}{mN} = \frac{\beta}{\pi}$ est assez indépendante de la valeur de N. On ne peut pas arriver à quelque chose de plus précis sur ce sujet. Aussi, dans les calculs qui suivent, a-t-on considéré β comme indépendant de N.

SUPPLÉMENT X

NOUVELLE THÉORIE MATHÉMATIQUE DES SONS RÉSULTANTS.

(Extrait du mémoire original.)

Page 191.

Le principe, admis en acoustique, de la superposition pure et simple des petits mouvements vibratoires, n'est rigoureusement vrai que dans le cas où les vibrations pendulaires composantes sont assez petites pour que les forces motrices produites par les déplacements soient sensiblement proportionnelles à ces déplacements eux-mêmes. *Si, au contraire, les amplitudes des vibrations sont assez grandes, pour que le carré des déplacements puisse exercer une influence notable sur la valeur des forces, il se développe un nouveau système de mouvements vibratoires simples dont la durée correspond à celle des sons résultants que l'on connaît.*

Le cas le plus simple est celui où nous n'avons à considérer que les mouvements d'un seul point matériel, retenu par une force d'élasticité dans une position d'équilibre déterminée, et ébranlé par les ondulations du milieu élastique ambiant ; c'est assez semblable à ce qui se passe dans l'oreille. Le point matériel correspond au manche du marteau ; la membrane du tympan, à un ressort élastique qui tend à le ramener dans une position déterminée.

Soient m la masse du point vibrant et x sa distance de la position d'équilibre au temps t. Supposons que la force k qui tend à le ramener dans sa position d'équilibre dépende non-seulement de la première, mais aussi de la seconde puissance de l'élongation, de telle sorte que :

$$k = ax + bx^2.$$

En outre, deux systèmes d'ondes sonores peuvent rencontrer le point matériel, et exercent sur lui des pressions périodiquement variables $f \sin (pt)$ et $g \sin (qt + c)$. L'équation du mouvement est donc

$$-m\frac{d^2x}{dt^2} = ax + bx^2 + f \sin (pt) + g \sin (qt + c). \tag{1}$$

On peut donc intégrer par séries cette équation en posant

$$x = \varepsilon x_1 + \varepsilon^2 x_2 + \varepsilon^3 x_3 + \text{etc.} \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned} f &= \varepsilon f_1 \\ g &= \varepsilon g_1 \end{aligned}\right\} \tag{2 a}$$

et en égalant séparément à zéro les termes multipliés par les mêmes puissances de ε. Donc

$$ax_1 + m\frac{d^2 x_1}{dt^2} = -f_1 \sin (pt) - g_1 \sin (qt + c) \tag{3 a}$$

$$ax_2 + m\frac{d^2 x_2}{dt^2} = -bx_1^2 \tag{3 b}$$

$$ax_3 + m\frac{d^2 x_3}{dt^2} = -2bx_1x_2 \tag{3 c}$$

etc.

L'intégrale complète de l'équation (3 a) est :

$$x_1 = \text{A} \sin \left(t\sqrt{\frac{a}{m}} + h \right) + u \sin (pt) + \nu \sin (qt + c)$$

où A et h sont les deux constantes d'intégration, et u et v ont les valeurs suivantes :

$$u = \frac{f_1}{mp^2 - \alpha} \quad \text{et } \nu = mq^2 - \alpha \cdot$$

Le premier terme x_1 de la série (2) correspond donc à trois sons dont le premier a un nombre de vibrations représenté par $\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{a}{m}}$, et cor-

respond au son propre du point vibrant. Ce son existe, il est vrai, au début du mouvement, mais il s'éteint rapidement. Nous pouvons donc le supposer nul dans le cas qui nous occupe et avoir alors :

$$x_1 = u \sin pt + v \sin (qt + c).$$

Ce premier terme nous fait voir que le point vibrant rend d'abord les deux sons excitateurs. Ce terme serait le seul de la série, si la force ne dépendait pas du carré de la distance, si b était nul, ou x assez petit pour que bx^2 fût négligeable devant ax. Dans ce terme se trouve encore la superposition pure et simple des vibrations. Les amplitudes u et v restent les mêmes, que le second son existe ou non.

En substituant dans (3) la valeur de x_1 tirée de (4) on a :

$$\begin{aligned} dx^2 + m \frac{d^2x_2}{dt^2} &= -b\,[u^2 \sin^2 (pt) + v^2 \sin^2 (qt + c) \\ &\quad + 2uv \sin (pt) \cos (qt + c)] \\ &= -b \Big\{ \frac{1}{2} (u^2 + v^2) - \frac{1}{2} u^2 \cos (2pt) \\ &\quad - \frac{1}{2} v^2 \cos (2qt + 2c) + uv \cos [(p - q)t - c] \\ &\quad - uv \cos [(p + q)t + c] \Big\}. \end{aligned}$$

L'intégrale de cette équation est la suivante, en négligeant encore le son propre du point vibrant :

$$\begin{aligned} x_2 + - \frac{b}{2a} (u^2 + v^2) - \frac{bn^2}{2(4mp^2 - a)} \cos (2pt) - \frac{bv^2}{2(4mq^2 - a)} \cos 2(qt + c) \\ + \frac{buv}{m(p - q)^2 - a} \cos [(p - q)t - c] + \frac{buv}{m(p+q)^2 - a} \cos [(p+q)t+c]. \qquad (5) \end{aligned}$$

Ce second terme fournit donc les sons dont les nombres caractéristiques sont $\frac{2p}{\pi}$, $\frac{2q}{\pi}$, $\frac{p-q}{\pi}$, $\frac{p+q}{\pi}$. Les deux premiers sont les premiers harmoniques des sons primaires, le troisième est le son résultant différentiel du premier ordre, et le quatrième le son résultant additionnel du premier ordre. L'amplitude des deux sons résultants contient en facteur le produit uv des amplitudes des sons primaires. Si ces deux dernières sont très-petites, l'amplitude des sons résultants est une quantité du second ordre, et croît en raison composée de u et de v. Il en résulte cette conséquence d'accord avec l'expérience, que, si les sons primaires sont très-faibles, les sons résultants doivent être inappréciables ; si, au contraire, les sons primaires sont forts, les sons résultants doivent croître dans une proportion plus forte.

Si le son propre $\sqrt{\frac{a}{m}}$ du point vibrant est plus grave que $(p - q)$, comme on peut le supposer dans la plupart des cas, pour le tympan et les osselets qui s'y rattachent, et si les intensités u et v sont assez voisines,

c'est le son $(p-q)$ qui, dans x_2, aura la plus grande intensité ; il correspond au son résultant grave ordinaire.

Le troisième terme de la série x_3 contient les sons $3p, 3q, 2p+q, p+2q, p-2q, p$ et q. Parmi eux $2p-q$ et $2q-p$ sont les résultants du second ordre, d'après la notation d'Hallstrœm. Leur amplitude est un infiniment petit du troisième ordre. Le n^{me} terme de la série donne les sons résultants du $n-1^{me}$ ordre, dont l'amplitude est un infiniment petit du n^{me} ordre.

L'analogie permet aisément de conclure qu'il en est de même d'un système de points matériels.

De l'hypothèse sur la valeur de la force motrice, que nous avons considérée plus haut comme égale à

$$k = ax + bx^2,$$

il résulte que, x changeant de signe, k change non-seulement de signe, mais de valeur absolue. Cette hypothèse ne convient donc qu'à un corps élastique, non symétrique dans le sens des déplacements positifs et négatifs ; ce n'est que dans ce cas que le carré de l'élongation peut exercer une influence sur le mouvement et produire les sons résultants du premier. Parmi les éléments constitutifs de l'oreille humaine, le tympan se distingue particulièrement par son défaut de symétrie, en ce qu'il est fortement tiré vers l'intérieur par le manche du marteau ; aussi crois-je pouvoir émettre l'opinion que c'est cette forme particulière du tympan qui permet la production des sons résultants.

Il résulte de la démonstration précédente que les sons résultants peuvent prendre naissance en dehors de l'oreille, peuvent avoir une existence objective. (Voir, dans le texte, la démonstration expérimentale.)

Dans les recherches mathématiques sur le mouvement vibratoire de l'air, on ne considère, en général, que les termes des équations qui contiennent les premières puissances des élongations des molécules et on néglige les autres. En conservant les termes qui contiennent la seconde puissance, on trouve :

1° Que tout point de la masse d'air, où les vibrations d'un seul des deux sons primaires sont assez énergiques, devient le centre de nouveaux systèmes d'ondes secondaires, correspondant aux harmoniques du son considéré ;

2° Que tout point de la masse d'air où les vibrations des deux sons primaires atteignent *simultanément* une intensité suffisante, devient le centre de nouveaux systèmes d'ondes secondaires correspondant aux sons résultants de différents ordres, par somme ou par différence.

Nous devons donc nous attendre à la formation de sons résultants dans l'air, lorsque les deux centres des deux systèmes d'ondes primaires sont assez voisins pour que la masse d'air intermédiaire soit fortement ébranlée par les deux sons. (Voir, dans le texte, le cas de l'harmonium.)

SUPPLÉMENT XI

DESCRIPTION DU MÉCANISME QUI PERMET D'OUVRIR LES DIFFÉRENTES SÉRIES DE TROUS DE LA SIRÈNE POLYPHONE.

Page 202.

La figure 57 est une section de la caisse supérieure de la sirène double, destinée à en montrer la construction intérieure. E est le tuyau à vent qui se prolonge dans l'intérieur de la caisse et est fixé dans la traverse supérieure du support A. La partie du tuyau à vent qui pénètre

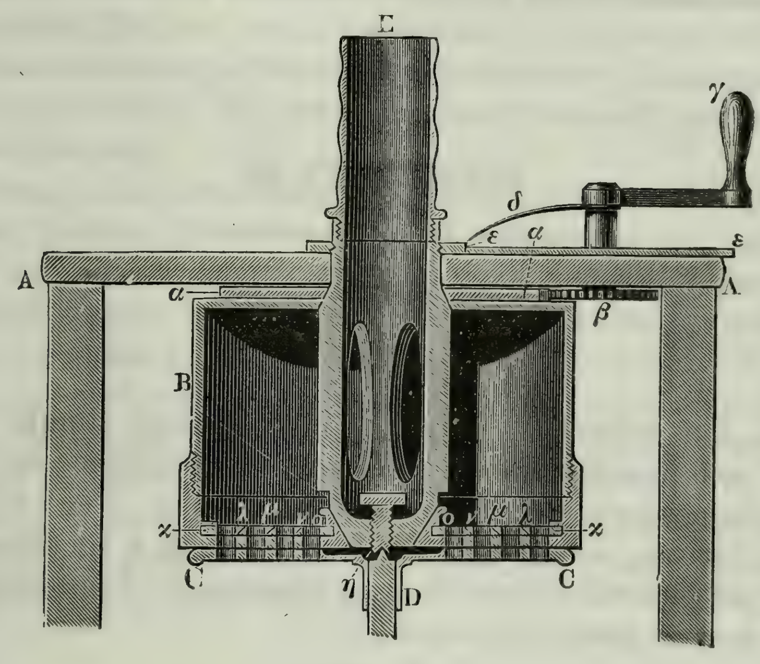


Fig. 57.

dans la caisse B présente à ses deux extrémités des surfaces coniques sur lesquelles glissent des excavations correspondantes du fond et de la partie supérieure de la caisse, en sorte que celle-ci peut tourner librement autour du tuyau à vent comme axe. On voit en α la section de la roue dentée qui repose sur le fond de la caisse. En β se trouve l'engrenage, mis en mouvement par la manivelle γ ; δ est l'indicateur dirigé suivant la division tracée sur le bord du disque.

D est l'extrémité supérieure de l'axe des disques mobiles d'où on voit les C, C supérieurs. L'axe repose sur une pointe fine dans un bassinet conique. Le bassinet supérieur se trouve à l'extrémité inférieure de la vis η, qui, au moyen d'un tourne-vis, peut être plus ou moins enfoncée, en sorte qu'on peut donner au mouvement de l'axe le degré voulu de facilité et de sûreté.

Dans l'intérieur de la caisse, on voit la section de quatre espaces annulaires percés de trous $\varkappa\lambda$, $\lambda\mu$, $\mu\nu$, et νo, qui empiètent les uns sur les autres comme des tuiles au moyen de bords taillés obliquement, et

se maintiennent réciproquement. Chacun de ces espaces annulaires correspond à une série de trous du couvercle, et contient exactement autant de trous que la série correspondante du couvercle et du disque tournant. Au moyen des boutons *i*, *i*, représentés dans la figure 49, p. 203, les quatre rigoles annulaires peuvent être déplacées, de manière que les trous de la rigole coïncident avec ceux de la caisse; l'air peut alors librement sortir, et il se produit le son correspondant. Si la rigole est au contraire placée de manière que les espaces pleins qu'elle présente coïncident avec les trous du couvercle, la série correspondante est fermée, et naturellement le son cesse de se produire.

On peut, à volonté, de cette manière, donner isolément, l'un après l'autre, ou simultanément, les divers sons de la sirène.

SUPPLÉMENT XII

(ajouté à la traduction française).

NOMBRE DES BATTEMENTS.

Page 207.

On a vu, dans le huitième chapitre, qu'un système simple de battements ne peut prendre naissance que par la coïncidence de deux sons simples. Supposons que la vitesse produite par l'un d'eux en un point donné de l'espace, par exemple, sur le tympan soit A sin $[2\pi mt]$ et celle produite par l'autre B sin $[2\pi nt + c]$; la vitesse due à l'action simultanée des deux sons au même point sera :

$$V = A \sin (2\pi mt) + B \sin [2\pi nt + c]. \tag{1}$$

En substituant dans le second membre la valeur

$$n = m - (m - n),$$

on obtient, d'après les formules connues,

$$V = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ A + B \cos [2\pi(m-n)t - c] \right\} \sin [2\pi mt] \\ \quad - B \sin [2\pi(m-n)t - c] \cos [2\pi mt] \end{array} \right\} \tag{1 a}$$

et, en posant

$$\left. \begin{array}{l} C \cos \varepsilon = A + B \cos [2\pi(m-n)t - c] \\ C \sin \varepsilon = B \sin [2\pi(m-n)t - c] \end{array} \right\} \tag{2}$$

on peut mettre l'expression de V sous la forme

$$V = C \sin [2\pi mt - \varepsilon] \tag{1 b}$$

où, par la combinaison des équations (2),

$$C^2 = A^2 + 2AB \cos [2\pi(m-n)t - c] + B^2 \qquad (2\ a)$$

$$\text{tang}\ \varepsilon = \frac{B \sin [2\pi(m-n)t - c]}{A + B \cos [2\pi(m-n)t - c]} \cdot \qquad (2\ b)$$

Maintenant, si la différence $m - n$ est petite, C et ε sont des variables périodiques à longue période ; C^2 varie entre les valeurs $(A+B)^2$ et $(A-B)^2$. L'arc ε, si A est $>$ B, ce qu'il faut toujours supposer dans ce qui va suivre, varie entre deux valeurs dont la différence est moindre que la demi-circonférence.

Dans ces conditions-là, nous pouvons considérer l'expression (1 *b*) comme celle d'une vibration pendulaire d'intensité C et de phase ε variables. Le nombre des maxima d'intensité par seconde est égal, d'après l'équation (2*a*), à $m - n$, c'est-à-dire à la différence des nombres de vibrations des sons primaires, ce qui démontre d'une manière générale la loi posée, p. 207, pour les sons d'intensité quelconque et de hauteurs différentes.

L'équation (1 *b*) fait reconnaître encore une variation de la hauteur qui se produit pendant les battements, et que l'oreille peut apprécier en réalité. Il est évident, en effet, que pendant le temps où la phase ε croît, la valeur placée sous le signe sinus croît plus lentement que celle correspondant au nombre de vibrations m ; au contraire, quand ε diminue, la valeur en question croît plus vite que mt et correspond à un son un peu plus aigu. Désignons par dt un temps infiniment petit par rapport à la période des battements ($m - n$ par seconde), mais qui n'en peut pas moins comprendre encore plusieurs périodes du nombre de vibrations m, nous pouvons poser le nombre de vibrations μ du mouvement représenté par (1 *b*) pendant le temps dt

$$\mu = m - \frac{1}{2\pi}\frac{d\varepsilon}{dt} \cdot$$

D'après l'équation (2 *b*) :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 2\pi(m-n)\,B\,\frac{A \cos [2\pi(m-n)t - c] + B}{A^2 + 2AB \cos [2\pi(m-n)t - c] + B^2}$$

d'où

$$\mu = m - \frac{1}{2\pi}\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{mA^2 + (m+n)AB \cos [2\pi(m-n)t - c] + nB^2}{A^2 + 2AB \cos [2\pi(m-n)t - c] + B^2} ;$$

La plus grande et la plus petite valeur de μ correspondent à $\cos [2\pi (m-n)t - c] = \pm 1$ et, par conséquent, au temps où l'intensité C^2 atteint aussi ses valeurs limites. Les limites de μ sont :

1° Au maximum de l'intensité

$$\mu = \frac{mA + nB}{A + B} = m - \frac{(m-n)\,B}{A + B}.$$

Ici la hauteur est intermédiaire entre celles des deux sons primaires, et se rapproche d'autant plus du son le plus fort, que l'intensité relative de celui-ci est plus considérable.

2° Au minimum de l'intensité

$$\mu = \frac{mA - nB}{A - B} = m + \frac{(m - n)B}{A - B}.$$

La hauteur est ici supérieure à celle du son le plus fort si celui-ci est plus haut que l'autre, et moindre si le son le plus fort est aussi le plus grave.

Si l'on écoute avec attention les battements lents de deux tuyaux d'orgue bouchés ou de deux diapasons, on entend en réalité une variation de ce genre dans la hauteur. Comme il est difficile de comparer avec certitude la hauteur d'un son très-fort et celle d'un son très-faible, il faut affaiblir tantôt le son le plus aigu, tantôt le son le plus grave. On distingue alors nettement un caractère différent dans les battements, comme une accentuation différente des maxima et des minima, qui tient à ce que c'est tantôt la phase supérieure, tantôt la phase inférieure qui présente le plus d'intensité.

SUPPLÉMENT XIII

CALCUL DE L'INTENSITÉ DES BATTEMENTS DE DIVERS INTERVALLES.

Page 241.

Nous nous servirons encore ici des formules relatives à l'intensité de la vibration par influence et développées sous les nos (4 *a*), (4 *b*), (5) et (5 *a*) dans le supplément VIII. Soient n le nombre de vibrations en 2π secondes pour le son de plus forte résonnance pour une des fibres de Corti, n_1 et n_2 les nombres correspondants des deux sons primaires, et B_1 et B_2 les maxima des vitesses de vibrations qu'ils produisent dans les organes de Corti accordés à la même hauteur ; les vitesses B_1 et B_2, que tous deux déterminent dans l'appendice dont le nombre de vibrations est n, sont d'après l'équation (5 *a*), supplément VIII :

$$B_1 = \mathbf{B}_1 \sin \varepsilon_1$$
$$B_2 = \mathbf{B}_2 \sin \varepsilon_2$$

où

$$\pi \operatorname{tang} \varepsilon = \frac{\beta}{\frac{n}{n_1} - \frac{n_1}{n}} \text{ et } \pi \operatorname{tang} \varepsilon_2 = \frac{\beta}{\frac{n}{n_2} - \frac{n_2}{n}}.$$

Ici β est une quantité que nous pouvons considérer comme indépendante de n. D'après cela, l'intensité des vibrations de l'organe de n vibrations, si les deux sons n_1 et n_2 agissent en même temps, oscille entre les valeurs :

$$(B_1 + B_2)^2 \text{ et } (B_1 - B_2)^2.$$

La différence entre les deux valeurs que prend l'intensité des battements est égale à

$$4B_1 B_2 = 4B_1 B_2 \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2. \qquad (7)$$

Donc, pour une différence de ton, l'intensité des battements dépend du produit $B_1 B_2$. Pour le m^{me} son partiel d'un son de violon nous pouvons poser $B^2 = \frac{2m}{a^2}$, d'après le supplément V, et, par conséquent, si le m_1^{me} et le m_2^{me} son partiels de deux sons de violon donnent des battements, nous posons l'intensité de leurs battements pour une même différence d'intervalle, égale à

$$\frac{a_2}{m_1 m_2}.$$

Cette expression a servi à calculer la dernière colonne du tableau, p. 242.

Pour le calcul de la dureté de divers intervalles, p. 247, nous emploierons pour abréger les notations suivantes :

$$n_1 + n_2 = 2N,$$
$$n_1 = N\,(1 + \delta),$$
$$n_2 = N\,(1 + \delta),$$
$$n = N\,(1 + \nu).$$

On a alors :

$$\pi \text{ tang } \varepsilon_1 = \frac{\beta}{\frac{1+\nu}{1+\delta} - \frac{1+\delta}{1+\nu}} \quad \pi \text{ tang } \varepsilon_2 = \frac{\beta}{\frac{1+\nu}{1+\delta} - \frac{1+\delta}{1+\nu}}.$$

La vibration par influence ne peut se produire avec force que si ν et δ sont très-petits, et par suite, on peut poser par approximation

$$\text{tang } \varepsilon_1 = \frac{\beta}{2\pi(\nu - \delta)}, \quad \text{tang } \varepsilon_2 = \frac{\beta}{2\pi(\nu + \delta)}.$$

Ces valeurs substituées dans l'équation (7) donnent :

$$4B_1 B_2 = 4B_1 B_2 \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + 4\pi^2(\nu - \delta)^2}\sqrt{\beta^2 + 4\pi^2(\nu + \delta)^2}}. \qquad (7\ a)$$

Si, maintenant, nous considérons comme invariable la hauteur à laquelle est accordé l'organe de Corti qui vibre par influence, la valeur de 4 $B_1 B_2$ atteint son maximum si $\nu = 0$, et si, par suite, $n = N = \frac{1}{2}(n_1 + n_2)$; ce maximum lui-même que nous désignerons par s est égal à

$$s = 4B_1 B_2 \frac{\beta^2}{\beta^2 + 4\pi^2\delta^2}. \qquad (7\ b)$$

Dans le calcul du degré de dureté due à l'émission simultanée de deux sons séparés l'un de l'autre par un intervalle de 2δ, je me suis

contenté de considérer le maximum (7 *b*) du battement, tel qu'il doit se produire dans l'organe de Corti réunissant les conditions les plus favorables. Des battements plus faibles pourront encore, il est vrai, se produire dans les arcs fibreux voisins, mais avec une intensité rapidement décroissante. Aussi pourrait-on considérer comme plus exact d'intégrer par rapport à ν la valeur de $4B_1 B_2$ dans l'équation (7 *a*), de manière à avoir la somme des battements dans tous les organes de Corti. Mais il faudrait alors avoir une idée au moins approximative de la densité des organes de Corti pour différentes valeurs de ν, c'est-à-dire pour différentes régions de la gamme, et c'est ce qui nous manque. En tout cas, dans la sensation, il est plus important de considérer le plus haut degré de dureté, que la répartition d'une moindre dureté sur un grand nombre d'organes sentants. C'est ce qui m'a décidé à ne prendre en considération que le maximum (7 *b*) des battements. — Il faut enfin considérer que des battements très-lents ne donnent point de dureté ; que cette dernière, à intensité égale, mais pour un nombre croissant de battements, atteint un maximum, puis diminue. Pour exprimer cette circonstance, il faut multiplier la valeur de s par un facteur qui s'annule quand le nombre des battements est très-petit, atteigne son maximum pour environ trente battements, diminue, et s'annule de nouveau pour un nombre infiniment grand de battements. Posons donc la dureté r provenant du α^{me} son partiel

$$r_\alpha = \frac{4\theta^2\delta^2\alpha^2}{(\theta^2 + \alpha^2\delta^2)^2} s_\alpha.$$

Le facteur de s atteint son maximum 1, si $\alpha\delta = \theta$, s'annule si δ, qui désigne la demi-distance des deux sons, devient nul ou infini. Comme il est indifférent que δ soit positif ou négatif, l'expression ne devait contenir que les puissances paires de δ. C'est l'expression la plus simple qui remplisse les conditions données, mais elle est naturellement arbitraire jusqu'à un certain point.

Pour θ, il faut prendre la demi-longueur de l'intervalle qui donne trente battements par seconde au-dessus du son fondamental.

Comme nous avons pris pour son fondamental ut_2 avec 264 vibrations, θ a été pris égal à $\frac{15}{264}$. On a donc définitivement :

$$r_\alpha = 16\, B_1 B_2 \frac{\beta^2\theta^2\delta^2\alpha^2}{(\beta^2 + 4\pi^2\delta^2)(\theta^2 + \alpha^2\delta^2)}.$$

C'est au moyen de cette formule qu'on a calculé, dans les diagrammes (*fig.* 52 A et B), les duretés des intervalles, produits par les harmoniques isolés, et qui se superposent dans le dessin. — Bien que la rigueur de cette théorie laisse encore beaucoup à désirer, elle nous suffit pour faire voir que notre hypothèse peut en réalité expliquer la répartition des dissonnances et des consonnances, telle que la fournit la nature.

SUPPLÉMENT XIV

BATTEMENTS DES SONS RÉSULTANTS.

Page 255.

Soient a, b, c, d, e, f, g, h, des nombres entiers. Soient an et $bn + \delta$, δ étant supposé très-petit par rapport à n, et a et b étant les deux termes du rapport $\frac{a}{b}$ réduit à sa plus simple expression, les nombres de vibrations de deux sons émis simultanément. Les nombres de vibrations de deux harmoniques de ces sons, devront être :

$$acn \text{ et } bdn + d\delta.$$

Ils produiront entre eux des battements au nombre de $d\delta$ si :

$$ac = bd,$$

ou

$$\frac{a}{b} = \frac{d}{c}.$$

Comme le rapport $\frac{a}{b}$ est supposé réduit à sa plus simple expression, les plus petites valeurs que puissent prendre d et c sont :

$$d = a \quad \text{et} \quad c = b;$$

les autres sont de la forme

$$d = ha \qquad c = hb.$$

Maintenant, c et d représentent les numéros d'ordre des sons partiels qui battent entre eux ; les sons partiels les plus graves remplissant cette condition seront par conséquent le $b^{\text{ième}}$ son de an et le $a^{\text{ième}}$ de $(bn + \delta)$. Le nombre des battements qu'ils donnent est $a\delta$.

De même le $2\,b^{\text{ième}}$ son partiel du premier son et le $2\,a^{\text{ième}}$ du second donnent $2\,a\delta$ battements, et ainsi de suite.

Les deux harmoniques

$$acn \text{ et } bdn + d\delta$$

donnent le son résultant (premier différentiel)

$$\pm [(bd - ac)n + d\delta]$$

où le signe doit être choisi de manière que la valeur de toute l'expression soit positive.

Deux autres harmoniques (fan) et $(gbn + g\delta)$ donnent le son résultant

$$\pm [(gb - af)\, n + g\delta].$$

Résonnant ensemble, ils donnent $(g \mp d)\delta$ battements si

$$bd - ac = \pm [gb - af]$$

ou

$$\frac{a}{b} = \frac{g \mp d}{f \mp c}.$$

Comme précédemment, la plus petite valeur de $(g \mp d)$ est a, les autres sont de la forme ha, et par conséquent le nombre minimum de battements est $a\delta$.

Pour trouver les plus graves des harmoniques dont la présence peut donner des battements avec les premiers différentiels, prenons pour c et d le signe inférieur ; nous obtenons alors

$$g = d = \frac{a}{2} \quad \text{ou } g = \frac{a+1}{2} \text{ et } d = \frac{a-1}{2}$$
$$f = c = \frac{b}{2} \quad \text{ou } f = \frac{b+1}{2} \text{ et } c = \frac{b-1}{2},$$

selon que a et b sont pairs ou impairs. Si b est le plus grand des deux nombres, $\frac{b+1}{2}$ est le plus grand nombre de sons partiels que chacun des deux sons doit avoir pour donner les battements de l'intervalle, tandis que, sans la considération des sons résultants, il en faudrait à peu près le double, c'est-à-dire b.

Si deux sons simples résonnent simultanément, les battements sont produits par les sons résultants d'ordre supérieur. L'expression générale d'un différentiel d'ordre supérieur de deux sons de n et de m vibrations, est $\pm [an - bm]$, et ce différentiel est d'ordre $(a + b - 1^{\text{ième}})$. Supposons que l'un des sons résultants de $(c + d - 1)^{\text{ième}}$ ordre des sons an et $(bn + \delta)$ soit :

$$\pm [bd - ca + d\delta]$$

et qu'un autre de $(f + g - 1)^{\text{ième}}$ ordre soit :

$$\pm [gb - fa + g\delta],$$

ils font entre eux $(g \pm d)\,\delta$ battements, si

$$[bd - ac = \pm (bg - af)]$$

ou

$$\frac{a}{b} = \frac{g \mp d}{f \mp c}.$$

Le plus petit nombre de battements possibles est donc encore $a\delta$, les plus petites valeurs de c, d, f, h se trouvent comme dans le cas précédent, en sorte que les numéros d'ordre des sons résultants n'ont pas besoin de dépasser $\frac{a+b-2}{2}$ si a et b sont impairs, ou $\frac{a+b-1}{2}$, si l'un des deux est pair.

Je vais ajouter encore ici quelque chose à ce qui a été dit dans le sep-

tième chapitre et dans le supplément XII, sur le mode de formation des sons résultants.

D'abord, les sons résultants doivent prendre naissance dans tous les cas, où l'écartement des molécules vibrantes de leur position d'équilibre est assez grand, pour que la force qui tend à les y ramener ne soit plus simplement proportionnelle à cet écartement. (Voir la théorie mathématique pour un point matériel, supplément VIII.) De même pour les vibrations de l'air d'une grandeur finie ; les traits principaux de la théorie sont donnés dans mon mémoire *Sur les vibrations de l'air dans les tuyaux ouverts.* Mais je veux appeler ici l'attention sur un troisième cas où des sons résultants peuvent être produits par des variations infiniment petites, ce qui a déjà été dit, p. 197. C'est le cas des sirènes et de l'harmonium. Nous avons ici des ouvertures dont la surface varie périodiquement, et de l'air à une plus grande pression d'un côté que de l'autre. Comme il ne s'agit jamais ici que de très-petites différences de pression, nous pouvons admettre que la masse q de l'air qui s'échappe soit proportionnelle à la grandeur de l'ouverture ω et à la différence de pression p, en sorte que

$$q = c\omega p$$

où c est une constante. Posons maintenant ω égal à la plus simple fonction périodique qui exprime qu'un orifice s'ouvre et se ferme alternativement, c'est-à-dire :

$$\omega = \mathrm{A}\,[1 - \sin 2\pi nt]$$

et considérons p comme constant, en admettant que ω soit assez petit et l'affluence de l'air assez grande, pour que la déperdition périodique par l'ouverture ne change pas essentiellement la pression, q sera de la forme

$$q = \mathrm{B}\,[1 - \sin 2\pi nt]$$
$$\mathrm{B} = c\mathrm{A}p.$$

La vitesse du mouvement vibratoire en un point quelconque de l'atmosphère devra être exprimée sous une forme analogue, en sorte qu'il ne se produira qu'un son de n vibrations. Mais s'il se trouve un second orifice plus grand d'ouverture variable par lequel s'opère une déperdition suffisante dans l'air, de telle sorte que la pression p elle-même ne soit plus constante, mais varie périodiquement, dans le même rapport que l'écoulement de l'air par l'autre orifice, et soit, par conséquent, de la forme :

$$p = \mathrm{P}\,(1 - \sin 2\pi mt),$$

q deviendra

$$q = c\mathrm{AP}\,[1 - \sin 2\pi nt]\,[1 - \sin 2\pi mt]$$
$$= c\mathrm{AP}\,[1 - \sin 2\pi nt - \sin 2\pi mt - \frac{1}{2}\cos 2\pi(m+n)t$$
$$+ \frac{1}{2}\cos 2\pi(m-n)t]\,;$$

il se produira donc, indépendamment des sons primaires n et m, en-

core les sons $m+n$ et $m-n$, c'est-à-dire les deux sons résultants du premier ordre.

En réalité, les équations seront toujours beaucoup plus compliquées que celles que j'ai posées ici pour représenter le phénomène sous sa forme la plus simple. Le son n influe sur la pression p aussi bien que m, ainsi que les sons résultants eux-mêmes; enfin, le plus souvent, la grandeur de l'orifice ne pourra être exprimée par une fonction périodique aussi simple que celle que nous avons adoptée pour ω. Il en résulte qu'indépendamment des sons, m, n, $m+n$, $m-n$, il se produit aussi leurs harmoniques et les sons résultants des harmoniques, ce qui est d'accord avec l'expérience. La théorie complète d'un cas semblable est extraordinairement compliquée; aussi fallait-il se borner à expliquer le cas simple qui a été examiné, pour expliquer au moins l'essence du phénomène.

Je vais rapporter encore ici une autre expérience dont l'explication est analogue. La caisse inférieure de ma sirène double vibre énergiquement par influence, lorsqu'on tient devant son ouverture inférieure le diapason la_2, tous les trous étant fermés; mais elle cesse de vibrer quand les trous d'une série sont ouverts. Si l'on fait tourner le disque de la sirène de manière à ouvrir et à fermer alternativement les trous, on obtient une résonnance du diapason d'intensité périodiquement variable. Si n est le nombre de vibrations du diapason, m le nombre de fois qu'un seul trou de la caisse est ouvert, l'intensité de la résonnance sera une fonction périodique du temps, et, dans le cas le plus simple, prendra la forme

$$1 - \sin 2\pi mt.$$

Le mouvement vibratoire de l'air prendra, par conséquent, la forme

$$(1 - \sin 2\pi mt) \sin 2\pi nt = \sin 2\pi nt + \frac{1}{2} \cos 2\pi (m+n)t$$
$$- \frac{1}{2} \cos 2\pi (n-m)t,$$

et on entend, par conséquent, indépendamment du son n, les sons $m+n$ et $n-m$. Si le disque tourne lentement, m est très-petit et les sons dont il s'agit sont très-voisins l'un de l'autre, de manière à battre ensemble. Pour une rotation rapide au contraire, l'oreille les distingue.

SUPPLÉMENT XV

PLAN D'UN INSTRUMENT ACCORDÉ SUIVANT LA GAMME NATURELLE ET A UN SEUL CLAVIER.

Page 777.

Si l'on veut disposer un orgue ou un harmonium de vingt-quatre sons à l'octave, de manière à pouvoir jouer juste dans tous les tons avec un

seul clavier, il faut répartir les sons de l'instrument en quatre paires de groupes, à peu près de la manière suivante :

(1 *a*)	*fa*,	*la*,	*ut*♯	(1 *b*)	*fa*,	*la*,	*ut*♯
(2 *a*)	*ut*,	*mi*,	*la*♭	(2 *b*)	*ut*,	*mi*,	*la*♭
(3 *a*)	*sol*,	*si*,	*mi*♭	(3 *b*)	*sol*,	*si*,	*mi*♭
(4 *a*)	*ré*,	*fa*♯,	*si*♭	(4 *b*)	*ré*,	*fa*♯,	*si*♭

Chacun de ces groupes doit être servi par un canal à air distinct venant du soufflet, et il faut y adapter des soupapes de manière que, suivant leur disposition, le vent soit amené dans le groupe de droite ou de gauche de chaque série horizontale. Sur l'orgue, on peut sans difficulté arriver à ce résultat; sur l'harmonium, au contraire, les touches devraient être disposées dans un autre ordre que les anches, et il faudrait, comme sur l'orgue, un mécanisme plus compliqué pour transmettre le mouvement des touches aux soupapes.

Il s'agit donc de disposer quatre soupapes, au moyen de registres ou pédales, dans un ordre différent pour chaque tonalité. Le tableau suivant présente les combinaisons des quatre séries horizontales :

TONS MAJEURS.	SÉRIES				TONS MINEURS.
	1	2	3	4	
ut♭*	*b*	*a*	*a*	*a*	(*mi*♭)
sol♭*	*b*	*b*	*a*	*a*	(*si*)
ré♭*	*b*	*b*	*b*	*a*	(*fa*)
la♭*	*b*	*b*	*b*	*b*	(*ut*)
mi♭*	*a*	*b*	*b*	*b*	(*sol*)
si♭*	*a*	*a*	*b*	*b*	(*ré*)
fa	*a*	*a*	*a*	*b*	*la*
ut	*a*	*a*	*a*	*a*	*mi*
sol	*b*	*a*	*a*	*a*	*si** ou *ut*♭
ré	*b*	*b*	*a*	*a*	*fa*♯* ou *sol*♭
la	*b*	*b*	*b*	*a*	*ut*♯* ou *ré*♭
mi	*b*	*b*	*b*	*b*	*sol*♯* ou *la*♭
si	*a*	*b*	*b*	*b*	*ré*♯* ou *mi*♭
	a	*a*	*b*	*b*	*la*♯* ou *si*♭

Les tons mineurs entre parenthèses ont une septième mineure juste, mais une sensible trop haute ; quant aux six tons marqués d'un astérisque, la disposition des registres est la même pour le majeur et le mineur.

Si l'on veut un cercle complet des toniques, permettant d'avoir en

même temps les tons majeurs et mineurs tout à fait exacts, il faut encore séparer des autres les sons *la♭*, *mi♭*, *si♭*, *fa*, *ut* et *sol*, de manière qu'en tirant un cinquième registre distinct, ces six notes puissent être confondues avec les sons *sol♯*, *ré♯*, *la♯*, *mi♯*, *si♯* et *fa♯♯* ; ce qui donne trente et un sons à l'octave. Par l'addition de ce nouveau registre, nous avons alors le système des tonalités suivantes :

TONS MAJEURS.	SÉRIES				TONS MINEURS.
	1	2	3	4	
fa	*a*	*a*	*a*	*b*	*fa*
ut	*a*	*a*	*a*	*a*	*ut*
sol	*b*	*a*	*a*	*a*	*sol*
ré	*b*	*b*	*a*	*a*	*ré*
la	*b*	*b*	*b*	*a*	*la*
mi	*b*	*b*	*b*	*b*	*mi*
si	*a*	*b*	*b*	*b*	*ré♯*
fa♯	*a*	*a*	*b*	*b*	*la♯*
ut♯	*a*	*a*	*a*	*b*	*mi♯*
sol♯	*a*	*a*	*a*	*a*	*si♯*
ré♯	*b*	*a*	*a*	*a*	*fa♯♯*
la♯	*b*	*b*	*a*	*a*	*ut♯♯*
mi♯	*b*	*b*	*b*	*a*	*sol♯♯*

Si l'on voulait seulement un cycle plus complet de tons mineurs, il faudrait non plus trente et un, mais seulement vingt-huit sons à l'octave, qui suffiraient pour les douze tons mineurs de *la*, *mi*, *si*, *fa♯* ou *sol♭*, *ut♯* ou *ré♭*, *sol♯* ou *la♭*, *ré♯* ou *mi♭*, *si♭*, *fa*, *ut*, *sol* et *ré*, et pour les dix-sept tons majeurs d'*ut♭* majeur à *sol♯* majeur.

SUPPLÉMENT XVI

APPLICATION AU CHANT DES INTERVALLES NATURELS.

Page 477.

Depuis la première édition de ce livre, j'ai eu occasion de voir l'orgue *enharmonique* du général Perronet Thompson (1), qui permet de

(1) *Principles and Practice of Just Intonation, illustrated on the Enharmonic Organ.* 7th Edition. London, 1863.

jouer dans la gamme naturelle, en passant par les gammes majeures et mineures de vingt et une toniques différentes, reliées harmoniquement. Cet instrument est beaucoup plus compliqué que mon harmonium; il renferme quarante tuyaux différents à l'octave, et trois manuels distincts présentant ensemble soixante-cinq touches à l'octave, ce qui permet de produire en partie les mêmes notes sur deux manuels ou sur tous les trois. On peut, sur cet instrument, exécuter des modulations beaucoup plus étendues que sur l'harmonium que j'ai décrit, sans qu'il soit nécessaire de recourir à des changements enharmoniques. On peut même y exécuter des passages assez rapides, et des fioritures, malgré sa tablature très-compliquée en apparence. L'orgue est installé dans la chapelle Sunday School, 10, Jewin Street, Aldersgate, à Londres, et construit par MM. Robson, 101, St. Martins's Lane, à Londres. Il ne contient qu'un registre du jeu principal ordinaire; il est muni d'un système de soupapes disposées comme les jalousies des fenêtres et d'un mécanisme particulier pour neutraliser l'influence de la température.

Les suites d'accords y sont extraordinairement harmonieuses, et peut-être même, à cause du timbre plus doux, d'une manière encore plus frappante que sur mon harmonium. Mais, pour la même raison, la distinction entre les accords justes et faux ne se fait pas aussi nettement sur cet orgue que sur mon instrument. J'ai eu occasion d'entendre à l'orgue une cantatrice qui avait souvent chanté avec accompagnement de l'orgue enharmonique, et je puis assurer que ce chant faisait éprouver le sentiment particulièrement agréable d'une parfaite sûreté d'intonation, ce qui fait ordinairement défaut avec l'accompagnement de piano. Il se trouvait là aussi un violoniste qui n'avait pas encore joué avec l'orgue, et qui accompagnait des airs connus, en se guidant par l'oreille seule. Il se maintenait en parfait accord avec l'intonation de l'orgue tant que le ton restait le même, et ce n'était que dans de rapides modulations accidentelles qu'il ne savait pas encore suivre exactement l'instrument.

A Londres aussi, on a occasion de comparer l'intonation de cet instrument avec l'intonation naturelle de chanteurs qui ont appris à chanter sans aucun accompagnement instrumental, et qui sont habitués à ne suivre que leur oreille. Ce sont les sociétés des Solfégistes (*Tonic-Solfa-Associations*) qui sont répandues en très-grand nombre (cent cinquante mille en 1862) dans les grandes villes d'Angleterre, et dont les grands progrès doivent être pris en grande considération pour la théorie de la musique. Ces sociétés désignent les notes de la gamme majeure par les syllabes, *do*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *ti*, *do*; *do* désignant toujours la tonique. Leurs chants ne sont point écrits en notation usuelle, mais avec les caractères d'imprimerie ordinaires, les sons étant désignés par les initiales des syllabes précédemment énumérées.

Quand une modulation vient changer la tonique, la notation est modifiée de manière que la nouvelle tonique s'appelle encore *do*. Ce changement

dans la notation s'indique en mettant, au-dessous de la note sur laquelle se fait la modulation, deux signes se rapportant l'un à l'ancienne, l'autre à la nouvelle tonique. Ce système met donc avant tout en évidence la relation de chaque note avec la tonique, tandis que la hauteur absolue à laquelle doit être exécuté le morceau n'est donnée qu'au commencement. Comme les intervalles de la gamme majeure naturelle se trouvent transportés dans chaque nouvelle tonalité où conduit la modulation, on chante dans tous les tons sans employer les intervalles tempérés. Que, dans une modulation d'*ut* majeur en *sol* majeur, le *mi* (ou si de notre notation) de la dernière gamme soit exactement le *ti* de la première, et que le *ré* (ou *la*) de la seconde corresponde à peu près au *la* (ou *la*) de la première, c'est ce que n'indique pas du tout le système de notation, et ce qui ne s'apprend que dans la suite de l'enseignement. L'élève n'a donc jamais occasion de confondre le *la* avec le *la* (1).

On ne peut se dissimuler que cette notation présente, pour l'enseignement du chant, le grand avantage de mettre en évidence ce qu'il y a de plus important pour la détermination du son chanté, c'est-à-dire sa relation avec la tonique. Il n'y a que quelques musiciens, d'un talent hors ligne, qui soient en état de retenir et de retrouver des hauteurs absolues, surtout lorsque d'autres sons sont émis en même temps. Or la notation usuelle ne donne directement que les hauteurs absolues, et encore celles-ci ne sont-elles prises que dans la gamme tempérée. Quiconque a souvent chanté à livre ouvert, sait combien il est plus facile de le faire avec un accompagnement de piano qui donne l'ensemble de l'harmonie, qu'à une seule voix. Dans le premier cas, il est facile de reconnaître si la note qu'il s'agit d'émettre est le son fondamental, la tierce, la quinte ou la dissonnance de l'accord actuellement frappé ; dans le second cas, on ne peut que monter ou descendre à partir de l'intervalle précédent, aussi juste que possible, et se reposer sur les instruments d'accompagnement et les autres pour arriver à la véritable hauteur.

Eh bien ! ce que le chanteur familiarisé avec l'ancienne théorie peut reconnaître d'après l'accompagnement, la notation des solfégistes l'indique immédiatement même à l'élève non exercé. Je me suis assuré par moi-même qu'il est beaucoup plus facile pour une voix seule, de chanter juste en faisant usage de cette notation, et dans une école po-

(1) Les principes sont exposés dans une grammaire *of vocal Music founded on the Tonic-Solfa Method by* J. Curwen, 19th Edition. London, Ward and Co. — Le livre des élèves s'appelle : *The standard Course of lessons on the Tonic-Solfa Method by* Curwen. London, Tonic-Solfa Agency. 43, Paternoster Row. Le Journal de l'Association est : *The Tonic-Solfa Reporter and Magazine of Vocal Music*. London, Ward and Co. On a publié une grande quantité de morceaux dans la notation des Solfégistes, entre autres de Mendelssohn (*Paulus*), de Haendel (*le Messie*, *Israël en Égypte*, *Macchabée*), de Dettinger (*Te Deum*), Haydn (*la Création*), etc.

(*) En France, l'école Galin-Paris-Chevé enseigne le solfége d'après des principes et au moyen d'une notation tout à fait analogues. (*Note du traducteur.*)

pulaire de Londres, j'ai eu occasion d'entendre plus de quarante enfants, de huit à douze ans, exécuter des exercices de chant, avec une sûreté dans l'émission de la note, une justesse dans l'intonation, qui m'ont plongé dans l'étonnement. Chaque année les écoles de solfégistes à Londres, donnent, dans le palais de cristal de Sydenham, un concert exécuté par deux à trois mille voix d'enfants, qui font la meilleure impression sur les auditeurs, à ce que m'ont assuré des musiciens, par l'harmonie et la précision de l'exécution.

Les solfégistes chantent d'après les intervalles naturels, et non d'après les intervalles tempérés. Quand ils chantent des chœurs avec accompagnement d'un orgue tempéré, il se produit des différences et des discordances très-appréciables, tandis qu'ils se trouvent en accord parfait avec l'orgue enharmonique du général Thompson. Plusieurs faits très-caractéristiques témoignent de l'exactitude de cette assertion. Une toute jeune fille devait chanter un *solo* en *fa* mineur : elle emporta la musique chez elle, pour la travailler au piano. Elle revint en expliquant que, sur son piano, le *la*♭ et le *ré*♭ n'étaient pas justes, c'est-à-dire la tierce et la sixte, pour lesquelles l'erreur de la gamme tempérée est en réalité le plus sensible. Une autre écolière était si satisfaite de l'orgue enharmonique qu'elle s'exerça pendant trois heures avec cet instrument, alléguant qu'il lui était très-agréable de jouer au moins une fois les *vraies notes.* Il est arrivé dans un grand nombre de cas, que des jeunes gens, ayant appris à chanter par la méthode *Solfa*, placés sans instructions préalables devant la tablature compliquée de l'orgue enharmonique, se retrouvaient d'eux-mêmes, et choisissaient toujours les intervalles théoriquement exacts.

Les chanteurs trouvent qu'il est plus facile de chanter avec accompagnement de l'orgue enharmonique, bien qu'ils n'entendent pas en chantant le son de l'instrument parce qu'il est en parfait accord avec la voix et ne fait point de battements avec elle.

Au reste, j'ai moi-même observé que, même des chanteurs habitués à l'accompagnement de piano, quand on leur fait chanter une mélodie simple avec l'harmonium juste, donnent les tierces et les sixtes naturelles, et non celles de Pythagore ou du tempérament égal. J'accompagnais le commencement de l'air, et je m'arrêtais au moment où le chanteur devait émettre la tierce ou la sixte de la gamme. Après qu'il avait posé le son, j'attaquais sur l'instrument l'intervalle naturel, pythagoricien ou tempéré. C'est le premier qui était toujours à l'unisson avec la note chantée, les deux autres faisaient entendre des battements bien nets.

D'après ces expériences, il ne peut, à mon avis, subsister aucun doute sur les propositions suivantes :

1° *Les intervalles théoriques, que j'ai appelés intervalles naturels dans mon livre, le sont bien effectivement pour une oreille non pervertie ;*

2° *Les erreurs de la gamme tempérée sont en réalité appréciables et désagréables pour une oreille juste ;*

3° *Malgré le peu de différence des intervalles pris isolément, il est beaucoup plus facile de chanter juste suivant la gamme naturelle que suivant la gamme tempérée.*

La complication que réclame la gamme naturelle et qui rend plus difficile le maniement des instruments à sons fixes, n'existe ni pour le chanteur, ni pour le violoniste, quand ceux-ci ne suivent d'autre guide que leur oreille. Car, dans la progression naturelle d'une musique régulièrement modulée, ils n'ont jamais à franchir que des intervalles de la gamme naturelle diatonique. Il n'y a de calcul compliqué que pour le théoricien, lorsqu'il veut comparer avec le point de départ le résultat définitif d'un grand nombre de progressions de ce genre.

Le système naturel peut être exécuté par des chanteurs; c'est ce que montrent les solfégistes anglais; il peut être mis en pratique par les instruments à archet; c'est même en réalité ce que font les artistes distingués; je ne puis en douter d'après les recherches de Delezenne, d'après le violoniste que j'ai entendu jouer avec l'orgue enharmonique, et par l'exemple de M. Joachim, cité plus haut. Parmi les autres instruments d'orchestre, les instruments de cuivre ont déjà, par eux-mêmes, la gamme naturelle et ne peuvent qu'avec peine s'accommoder au système tempéré. Les instruments en bois pourraient modifier un peu leur son pour s'accorder avec les autres. Je ne crois donc pas qu'on puisse considérer comme insurmontables les difficultés du système naturel; je crois même que beaucoup de nos meilleures exécutions musicales doivent leur beauté à la pratique inconsciente du système naturel; nous pourrions seulement rendre ces jouissances plus fréquentes, si nous faisions reposer tout enseignement musical sur cette gamme, et non sur le système tempéré qui tend à empêcher la voix humaine et les instruments à archet de développer toute leur harmonie, pour ne point compliquer le jeu du piano ou de l'orgue.

Je veux encore ici appeler l'attention sur le système de signes proposés par M. Ellis (1), pour introduire la gamme naturelle dans la notation usuelle. Il n'a besoin que de deux nouveaux signes, le signe + pour l'élévation de la note d'un comma de $\frac{81}{80}$, et le signe ‡ pour l'abaissement de la même quantité; en revanche, ♯ signifie l'élévation d'un limma $\frac{135}{128}$, et ♭ l'abaissement correspondant. Les notes, non précédées de signes *ut, ré, mi, fa, sol, la, si*, ont les valeurs que présente la gamme d'*ut* majeur, p. 424, ci-dessus.

L'armure du ton de *sol* majeur comprend alors, outre un ♯ devant le *fa*, un + devant le *la*.

Dans le ton de *ré* majeur, vient s'ajouter un second ♯ devant *ut* et un second + devant le *mi*.

En *la* majeur (ou plutôt en + *la* majeur), vient un troisième ♯ devant le *sol* et un troisième + devant le *si*.

(1) *Proceedings of the Royal Society*. 1864, n° 90.

On voit facilement comment on continuerait en procédant par quintes ascendantes.

Inversement, en *fa* majeur, indépendamment du ♭ devant le *si*, il y a un ‡ devant le *ré*. En *si*♭, un second ♭ devant le *mi*, un second ‡ devant le *sol*.

En *mi*♭, un troisième ♭ devant le *mi*, un troisième ‡ devant l'*ut*, et ainsi de suite.

La gamme descendante de *la* mineur se distingue de celle d'*ut* majeur par un ‡ devant le *ré*. Dans la gamme mineure ascendante, la sensible de *la* doit être désignée par ‡♯ *sol*, car ♯ *sol* est la sensible de + *la*, comme on l'a vu précédemment ; il faut de même prendre le ‡♯ *fa* pour tierce du ‡ *ré*. De même dans les autres gammes mineures.

Pour la tonalité principale, les signes + et ‡ doivent être répétés à chaque ligne comme les ♯ et les ♭. Quand il arrive des modulations, les nouveaux signes doivent être placés devant les notes.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

COMPOSITION DES VIBRATIONS.

HARMONIQUES ET TIMBRES.

DEUXIÈME PARTIE

DES SONS SIMULTANÉS.

SONS RÉSULTANTS ET BATTEMENTS. — CONSONNANCE ET DISSONNANCE.

TROISIÈME PARTIE

AFFINITÉS DES SONS.

GAMMES ET TONALITÉS.

SUPPLÉMENTS.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

Corbeil, typ. et stér. de Crété et Fils.

PUBLICATIONS

DE

VICTOR MASSON ET FILS

MAI 1868

ACCOUCHEMENTS (**Atlas de l'art des**), par MM. Lenoir, Marc Sée et Tarnier. Paris, 1865, 1 vol. de texte gr. in-8 jésus imprimé sur deux colonnes et 1 vol. d'atlas contenant 105 planche dessinées d'après nature par M. Beau. Les deux volumes cartonnnés en toile.................... 60 fr.
Avec demi-reliure maroquin rouge, tranche supérieure dorée..... 70 fr.

ACTON (W.). — **Fonctions et désordres des organes de la génération** chez l'enfant, le jeune homme, l'adulte et le vieillard, sous le rapport physiologique, social et moral; traduit de l'anglais sur la troisième édition. Paris, 1863, 1 vol. in-8.................................. 6 fr.

ADANSON (Michel). — **Histoire de la botanique** et plan des familles naturelles des plantes; 2e édition, préparée par l'auteur et publiée sur ses manuscrits, par Alex. Adanson et J. Payer. Paris, 1847-1864, 1 vol. grand in-8, avec une planche............................ 6 fr.

AGARDH (J.). — **Algæ maris Mediterranei et Adriatici**, observationes in diagnosin specierum et dispositionem generum. Parisiis, 1841, grand in-8.. 3 fr. 50

AGARDH (J.). — **Species, genera et ordines Algarum**: — Volumen primum, Algas fucoideas complectens. Lundæ, 1848, 1 v. in-8. 12 fr.
— Volumen secundum, Algas florideas complectens, publié en cinq fascicules. Lundæ, 1851-1863..................................... 39 fr.

AGARDH (J.). — **Theoria systematis Plantarum**; accedit familiarum phanerogamarum in series naturales dispositio secundum structuræ normas et evolutionis gradus instituta. Lundæ, 1858, 1 vol. in-8, avec atlas de 28 planches.. 24 fr.

AGASSIZ. — **Système glaciaire**, ou Recherches sur les glaciers, leur mécanisme, leur ancienne extension, et le rôle qu'ils ont joué dans l'histoire de la terre. Paris, 1847, 1 vol. grand in-8, avec un atlas de 3 cartes et 9 planches en partie coloriées.................................. 50 fr.

ALIBERT (C.). — **Des eaux minérales dans leurs rapports avec l'économie publique**, la médecine et la législation. Paris, 1852, in-8.. 1 fr. 50

ALLIX. — **Étude sur la physiologie de la première enfance.** Paris, 1867, 1 vol. gr. in-8.................................. 4 fr.

ANATOMIE DESCRIPTIVE DU CORPS HUMAIN :

— **Locomotion, circulation, digestion, respiration, appareil génito-urinaire,** par MM. Bonamy, Broca et Beau. 258 pl. in-8 jésus, avec texte explicatif en regard.

— **Système nerveux, organes des sens de l'homme,** par Ludovic Hirschfeld. Deuxième édition. 1 vol. de texte et atlas de 92 planches in-8 jésus, dessinées par Leveillé, avec texte explicatif en regard.

Les deux ouvrages réunis en cinq atlas ; planches noires......... 190 fr.
planches coloriées... 370 fr.

ANATOMIE TOPOGRAPHIQUE (Traité d'), comprenant les principales applications à la pathologie et à la médecine opératoire. Atlas, par MM. Paulet et Sarasin. Texte, par M. Paulet.

CONDITIONS DE LA SOUSCRIPTION.

Le *Traité d'Anatomie topographique* comprendra 2 volumes d'atlas publiés dans le format gr. in-8 jésus et 1 volume de texte d'environ 800 pages.

Le premier volume de l'Atlas a paru; il est consacré à la Tête et au Tronc.

Il renferme..............................	88	planches comprenant	119 figures.
Le deuxième volume traitera des Membres.			
Il renfermera............................	76	— —	121 —
	164		240

L'ouvrage sera complet en 41 livraisons de chacune 4 planches tirées en couleur, sur papier teinté, avec texte explicatif en regard. Prix de chaque livraison......... 4 fr.

Le volume de texte sera publié en cinq fascicules. Ces fascicules seront fournis gratuitement aux souscripteurs qui auront retiré régulièrement les livraisons. Ils paraîtront avec les livraisons 1, 11, 21, 31, 41.

Après l'achèvement de la publication, le prix du volume de texte sera porté à 12 francs.

Il paraît une livraison le 25 de chaque mois, à partir du 25 décembre 1865.

29 livraisons sont en vente.

ANDRAL. — Clinique médicale, ou Choix d'observations recueillies à l'hôpital de la Charité; 4e édition, revue, corrigée et augmentée. Paris, 1840, 5 volumes in-8.. 40 fr.

ANDRAL. — Essai d'hématologie pathologique. Paris, 1843, in-8.. 4 fr.

Annales de chimie et de physique.

Annales des sciences naturelles.

Annales médico-psychologiques.

Pour ces trois recueils, voyez ***Publications périodiques***, pages 29 et suivantes.

Annuaire scientifique, publié par M. Dehérain, avec la collaboration de plusieurs savants. — *Voy.* Dehérain, page 9.

Archives de physiologie normale et pathologique, dirigées par MM. *Brown-Séquard, Charcot* et *Vulpian,* paraissant tous les deux mois par fascicules grand in-8° cavalier. (Voir aux *Publications périodiques.*)

AUDOUIN (V.) et MILNE-EDWARDS. — Recherches pour servir à l'histoire naturelle du littoral de la France, ou Recueil de mémoires sur l'anatomie, la physiologie, la classification et les mœurs des animaux de nos côtes. 2 volumes grand in-8, ornés de planches gravées et coloriées.. 34 fr.

AUVERT (ALEX.). — **Selecta Praxis medico-chirurgicæ quam Mosquæ exercet;** typis et figuris expressa Parisiis, moderante *Amb. Tardieu.* 2e édition. Paris, 1856, 2 vol. gr. in-folio, cartonnés. 500 fr.
Les mêmes, reliés en demi-maroquin, tranche supérieure dorée. 540 fr.

120 planches grand in-folio demi-colombier, gravées en taille-douce, tirées en couleur et retouchées au pinceau, avec un texte explicatif imprimé dans le même format et placé en regard de la planche.

BACCALAURÉAT ÈS SCIENCES (le). — **Résumé des connaissances** exigées par le programme officiel.
3 vol. grand in-18, avec figures........................... 24 fr.

— **Littérature,** par *O. Gréard*, inspecteur d'Académie.

— **Histoire et Géographie**, par *E. Levasseur*, membre de l'institut, professeur au lycée Napoléon.

— **Philosophie**, par *Brisbarre*, professeur au lycée de Versailles.

— **Arithmétique et Algèbre**, par *Mauduit*, professeur au lycée Saint-Louis.

— **Géométrie et Trigonométrie**, par *Ch. Vacquant*, professeur au lycée Saint-Louis.

— **Géométrie descriptive et Cosmographie**, par *A. Tissot*, professeur au lycée Saint-Louis.

— **Mécanique,** par *E. Burat*, professeur au lycée Saint-Louis

— **Physique**, par *Em. Fernet*, professeur au lycée Saint-Louis.

— **Chimie,** par *L. Troost*, professeur au lycée Bonaparte.

— **Histoire naturelle,** par *Alph. Milne-Edwards*, professeur à l'École de Pharmacie.

Chaque partie est vendue séparément. — *Voy.* pour le détail au nom de chacun des auteurs.

BAILLON. — **Étude générale du groupe des Euphorbiacées.** Recherche des types. — Organographie. — Organogénie. — Distribution géographique. — Affinités. — Classification. — Description des genres. Paris, 1858, 1 vol. grand in-8, avec atlas cartonné............. 36 fr.

— *Voy.* PAYER.

BAILLON. — **Monographie des Buxacées et des Stylocérées.** Paris, 1859, 1 vol. grand in-8, avec 3 planches gravées........... 5 fr.

BALTET. — **L'horticulture en Belgique**, son enseignement, ses institutions, son organisation officielle. Paris, 1865, 1 vol. in-4, avec 7 pl.. 10 fr.

BALTET (CH.). — **Culture du poirier,** comprenant la plantation, la taille, la mise à fruit et la description des cent meilleures poires. 4e édition. Paris, 1867, 1 vol. in-18, avec figures................. 1 fr.

BARRAL. — **Trilogie agricole.** Force et faiblesse de l'agriculture française. Services rendus par la chimie à l'agriculture. Les engrais chimiques et le fumier de ferme. Paris, 1867, 1 vol. in-18........ 3 fr. 50

BASSET (N.). — **Traité théorique et pratique de la fermentation,** considérée dans ses rapports généraux avec les sciences naturelles et l'industrie. Paris, 1858, 1 vol. gr. in-18...................... 3 fr. 50

BATTAILLE (CH.). — **Nouvelles recherches sur la phonation.** Paris, 1860, 1 vol. in-8, avec 7 planches........................ 4 fr.

BATTAILLE (Ch.). — **De l'enseignement du chant.** 2e partie, de la Physiologie appliquée à l'étude du mécanisme animal. Paris, 1863, in-8. 2 fr.

BAUDRY. — *Voy.* **Catéchisme d'agriculture.**

BÉRENGUIER (Adrien). — **Traité des fièvres intermittentes et rémittentes** des pays tempérés et non marécageux et qui reconnaissent pour cause les émanations de la terre en culture. Paris, 18651, 1 vol. in-8. 5 fr.

BERNE et **DELORE.** — **Influence de la physiologie moderne sur la médecine pratique.** Paris, 1864, 1 vol. in-8........ 7 fr.

BERNE. — **De la nature de la fièvre puerpérale.** Paris, 1867, brochure in-8.. 2 fr. 50

BERT (Paul). — **Catalogue méthodique des animaux vertébrés** qui vivent à l'état sauvage dans le département de l'Yonne, avec la clef des espèces et leur diagnose. Paris, 1864, in-8, 2 pl................ 4 fr.

BERTILLON (A.). — **Conclusions statistiques contre les détracteurs de la vaccine**, ou Essai sur la durée comparative de la vie humaine au XVIIIe et au XIXe siècle. Paris, 1857, 1 vol. gr. in-18. 2 fr.

BEUDANT. — **Cours élémentaire de minéralogie et de géologie.** 10e édition. Paris, 1863, 1 vol. in-18, avec 800 figures..... 6 fr.

BICHAT. — **Recherches physiologiques sur la vie et la mort,** suivies de notes par M. le Dr Cerise. 4e édit. Paris, 1 vol. gr. in-18.. 3 fr.

BILLOD (E.). — **Traité de la Pellagre,** d'après les observations recueillies en Italie, en France et principalement dans les asiles d'aliénés. Paris, 1865, 1 vol. in-8.. 10 fr.

BOINET. — **Iodothérapie, ou De l'emploi médico-chirurgical** de l'iode et de ses composés, et particulièrement des injections iodées. 2e *édition*. Paris, 1865, 1 vol. in-8.............................. 14 fr.

BOINET. — **Ovariotomie. Traité pratique des maladies des ovaires** et de leur traitement, précédé d'un Aperçu anatomique et physiologique de ces organes. Paris, 1867, 1 vol. in-8.................. 7 fr.

BOISSIER. — **Icones Euphorbiarum,** avec figures de 122 espèces du genre Euphorbia, avec les considérations sur la classification et la distribution géographique des plantes de ce genre. Paris, 1866, 1 vol. in-folio de 122 planches, avec texte explicatif.............................. 70 fr.

BOITEL. — **Mise en valeur des terres pauvres par le pin maritime,** culture et exploitation de cette essence en Gascogne et en Sologne. 2e édition. Paris, 1857, 1 vol. grand in-8, avec une planche et vignettes dans le texte.. 3 fr.

BONAMY, BROCA et **BEAU.** — **Atlas d'anatomie descriptive du corps humain,** ouvrage pouvant servir d'atlas à tous les traités d'anatomie.

Cet ouvrage comprend quatre parties qui sont vendues séparément :

	Fig. noires.	ig. coloriées.
Appareil de la locomotion, 84 planches dont 2 doubles................................	44 fr.	88 fr.
Appareil de la circulation, 64 pl................	32	64
Appareil de la digestion et rein, 50 pl...........	25 fr.	50 fr.
Appareil génito-urinaire ; respiration, 56 pl......	28	56

Névrologie. (*Voy.* Ludovic Hirschfeld, page 16.)

BONNET. — L'aliéné devant lui-même, l'appréciation légale, la législation, les systèmes, la société et la famille, avec une préface par Brierre de Boismont. Paris, 1866, 1 vol. in-8........................ 9 fr.

BORSIERI (J. B.), DE KANILFELD. — Instituts de médecine pratique. Des Fièvres et des Maladies exanthématiques fébriles ; traduits par le docteur P. E. CHAUFFARD. Paris, 1855, 2 vol. grand in-8..... 16 fr.

BOUCHARD. — De la tuberculose et de la phthisie pulmonaire. Paris, 1867, 1 broch. in-18........................ 1 fr. 50

BOURGAREL (E.). — **Conseils aux mères** concernant l'hygiène et les maladies les plus communes de l'enfance. 1863, 1 vol. in-18... 3 fr. 50

BOUTIGNY (d'Évreux). — **Études sur les corps à l'état sphéroïdal** ; nouvelle branche de physique. 3e édition. Paris, 1857, 1 vol. in-8, avec 26 figures intercalées dans le texte .... 7 fr.

BOUTRON ET F. BOUDET. — Hydrotimétrie. Nouvelle méthode pour déterminer les proportions des matières en dissolution dans les eaux de sources et de rivières. 4e édition. Paris, 1866, grand in-8...... 3 fr.

BRIAU (RENÉ). — **Service de santé militaire chez les Romains.** Paris, 1866, broch. in-8.................................. 3 fr. 50

BRIQUET (P.). — Recherches expérimentales sur les propriétés du quinquina et de ses composés; ouvrage couronné par l'Académie des sciences. 2e édition. Paris, 1855, 1 vol. in-8...... 4 fr.

BRISBARRE (J.). — Éléments de philosophie (extrait du Baccalauréat ès sciences). Paris, 1865, 1 vol. in-18................ 1 fr. 50

BROCA (P.). — De l'étranglement dans les hernies abdominales et des affections qui peuvent le simuler. 2e édition. Paris, 1857, 1 vol. in-8.. 5 fr.

BROWN-SÉQUARD. — Journal de la physiologie de l'homme et des animaux.

Ce recueil, publié sous la direction du docteur BROWN-SÉQUARD, de 1858 à 1863, comprend 6 volumes grand in-8, avec planches et figures dans le texte.. 80 fr.

— *Voy.* aux recueils périodiques ARCHIVES DE PHYSIOLOGIE.

BROWN-SÉQUARD. — Leçons sur le diagnostic et le traitement des principales formes de paralysie des membres inférieurs ; traduites de l'anglais par le docteur RICHARD GORDON ; seconde édition, revue et annotée par l'auteur, avec une introduction sur la Physiologie des actions réflexes, empruntée aux leçons du professeur CH. ROUGET. Paris, 1864, 1 vol. in-8.................................. 3 fr. 50

BUEK. — Index Candolleanus. (*Voy.* DE CANDOLLE.)

BULLETIN de la Société anatomique de Paris. — Anatomie normale. — Anatomie pathologique. — Clinique. IIe série, de 1856 à 1863, 7 vol. in-8.. 30 fr.

Chaque volume séparément.................................. 6 fr.

TABLE analytique générale des matières contenues dans les Bulletins de la SOCIÉTÉ ANATOMIQUE DE PARIS pour les trente premières années (1826-1855), suivie d'une table alphabétique des membres de la Société et des présentateurs de pièces ou observations mentionnées dans la première série des *Bulletins*. Paris, 1857, 1 vol. in-8.................... 7 fr.

BULLETIN de divers Sociétés savantes. — *Voy.* aux *Publications périodiques,* pages 29 et suiv.

BUNSEN (Robert). — **Méthodes gazométriques.** Traduit de l'allemand sous les yeux de l'auteur et avec son concours, par M. Th. Schneider. Paris, 1858, 1 vol. in-8, avec 60 gravures intercalées dans le texte. 5 fr.

BURAT (E.).— **Précis de mécanique** (*de la collection du Baccalauréat ès sciences*). 2e édition conforme aux nouveaux programmes. Paris, 1868, 1 vol. in-18, avec figures dans le texte.................... 2 fr.

BURDEL. — **Des fièvres paludéennes,** Recherches sur leur véritable cause, suivies d'études physiologiques et médicales sur la Sologne. Paris, 1858, 1 vol. grand in-18.............................. 3 fr. 50

BURGGRAEVE. — **Études médico-philosophiques** sur Joseph Guislain. Aliénation mentale. Questions sociales. Paris, 1867, 1 vol. gr. in-8 .... 12 fr.

CABANIS. —**Rapports du physique et du moral de l'homme ;** nouvelle édition publiée par le docteur Cerise. Paris, 1867, 2 vol. in-18. 6 fr.

CAHIERS d'histoire naturelle, par MM. Milne-Edwards et Achille Comte. Nouvelle édition. 3 vol. in-12.

Zoologie, avec 15 planches...................... 2 fr.
Botanique, avec 9 planches...................... 2 fr.
Géologie, avec 10 cartes gravées sur acier....... 2 fr.

CAP (P. A.). — **Études biographiques** pour servir à l'histoire des sciences. IIe série : chimistes, naturalistes, médecins et pharmaciens. Paris, 1864, 1 vol. grand in-18.............................. 3 fr.

CARRIÈRE. — **Les cures de petit-lait et de raisin,** en Allemagne et en Suisse, dans le traitement des principales maladies chroniques et particulièrement de la phthisie pulmonaire. Paris, 1860, 1 vol. in-8. 4 fr. 50

CATÉCHISME d'AGRICULTURE, par MM. Baudry et Jourdier, 2e édition revue et corrigée. Paris, 1867, 1 vol, in-18, avec 89 fig. 1 fr.

CAZALIS. — **Œuvres agricoles de Cazalis-Allut,** recueillies et publiées par son fils le docteur F. Cazalis, et précédées d'une notice biographique sur l'auteur, par M. Marès. 1 vol., orné d'un portrait. Paris, 1865.. 6 fr.

CHANCEL. — **Analyse chimique.** (*Voy.* Gerhardt.)

CHARCOT. — *Voy.* Archives de Physiologie (*Publications périodiques*).

CHARNACÉ (le comte Guy de). — **Études sur les animaux domestiques.** — Amélioration des races. — Consanguinité. — Haras. — Paris, 1864, 1 vol. grand in-18.............................. 3 fr. 50

CHASSAGNY. — **Nouveaux moyens hémostatiques** avant et après les accouchements compliqués d'insertion du placenta sur le col. Paris, 1868, in-8.. 2 fr.

CHASSAIGNAC. — **Traité clinique et pratique des opérations chirurgicales,** ou Traité de thérapeutique chirurgicale. Paris, 1861-1862, 2 vol. grand in-8, avec figures dans le texte........... 28 fr.

CHASSAIGNAC. — **Traité pratique de la suppuration et du drainage chirurgical.** Paris, 1859, 2 vol. grand in-8..... 18 fr.

CHENU. — Manuel de Conchyliologie et de Paléontologie conchyliologique, contenant la description et la représentation de près de 5,000 coquilles. Paris, 1862, 2 vol. in-4, avec 4943 figures dans le texte, dont les principales coloriées.......................... 32 fr.

— **Rapport au conseil de santé des armées** sur les résultats du service médico-chirurgical aux ambulances de Crimée et aux hôpitaux militaires français en Turquie, pendant la campagne d'Orient, en 1854, 1855 et 1856. Paris, 1865 ; ouvrage couronné par l'Institut. 1 beau vol. in-4, accompagné de nombreux tableaux.......................... 20 fr.

— **Recrutement de l'armée et population de la France.** 1 vol. gr. in-4. Paris, 1867.......................... 3 fr.

CHOMEL (A. F.). — Éléments de pathologie générale. 5e édition. Paris, 1863, 1 vol. in-8.......................... 9 fr.

CHOMEL (A. F.). — Des dyspepsies. Paris, 1857, 1 vol. in-8. 6 fr.

CHURCHILL (J. F.). — De la cause immédiate de la phthisie pulmonaire et des maladies tuberculeuses et de leur traitement spécifique par les hypophosphites, d'après les principes de la médecine stœchiologique. 2e édition. Paris, 1864, 1 vol. in-8 de 1000 pages.......................... 17 fr.

CLAVEL. — Traité d'éducation physique et morale. Paris, 1855, 2 vol. grand in-18, avec 2 cartes.......................... 3 fr.

CLOQUET (H.). — Atlas d'anatomie, comprenant 83 planches gravées en taille-douce, 2 vol. in-4. Deux parties seules sont encore en vente :

Myologie, 36 planches......... 5 fr.
Splanchnologie, 47 planches... 7 fr.

COMTE (A.). — Introduction au règne végétal de A. L. de Jussieu, disposée en tableau méthodique. Une feuille gr. colombier.... 1 fr. 25

COMTE (A.). — Le Règne animal, disposé en tableaux méthodiques. Quatre-vingt-onze tableaux, sur grand colombier, représentant environ *cinq mille figures* d'animaux.......................... 114 fr.

COMTE (Achille). — Structure et physiologie de l'homme, démontrées à l'aide de figures coloriées, découpées et superposées. 9e édition. Paris, 1868, 1 vol. grand in-18, avec atlas de 8 planches gravées en taille-douce et figures dans le texte.................. 4 fr. 50

COMTE. — Planches murales d'histoire naturelle. Ces planches sont imprimées sur papier à fond noir et coloriées avec le plus grand soin ; elles mesurent près d'un mètre carré, et comprennent toutes les questions des programmes d'Histoire naturelle de l'enseignement secondaire et de l'enseignement spécial. — La liste détaillée de cette collection est envoyée à quiconque veut bien en faire la demande.

1re série. Zoologie, 52 planches en 60 feuilles.
2me série. Botanique, 26 feuilles.
3me série. Géologie, 14 planches en 17 feuilles.

Prix de la collection de 100 planches.......................... 350 fr.
Chaque feuille séparément.......................... 4 fr.

COMTE. — Notions sanitaires sur les végétaux dangereux, sur leurs caractères distinctifs et les moyens de remédier à leurs effets nuisibles. Trois planches de près d'un mètre carré chacune, contenant environ 100 figures coloriées avec le plus grand soin, et accompagnées d'un texte explicatif. — Planche I, Champignons comestibles. — Planche II, Champignons dangereux. — Planche III, Plantes vénéneuses.................... 15 fr.

CONGRÈS MÉDICAL international de 1867 (Compte rendu du). Paris, 1868, 1 vol. in-8, publié par M. JACCOUD, secrétaire général. 12 fr.

CORBIÈRE (BEUNAICHE DE LA). — **Traité du froid,** de son action et de son emploi intus et extra en hygiène, en médecine et en chirurgie. Deuxième édition. Paris, 1866, 1 vol. in-8 .... 7 fr. 50

CORVISART (L.). — Collection de mémoires sur une fonction méconnue du pancréas, la digestion des aliments azotés. Paris, 1857-1863, 1 vol. in-8.. 4 fr. 50

COSSON (E.) ET GERMAIN (E.). — Flore des environs de Paris, ou Description des plantes qui croissent spontanément dans cette région et de celles qui y sont généralement cultivées, accompagnée de tableaux synoptiques et d'une carte des environs de Paris. 2e édition, 1861, 1 très-fort vol. in-8... 15 fr.

COSSON (E.) ET GERMAIN (E.). — Synopsis de la Flore des environs de Paris, destinée aux herborisations, contenant la description des familles et des genres, celle des espèces et des variétés sous la forme analytique, avec leur synonymie et leurs noms français, l'indication des propriétés des plantes employées en médecine, dans l'industrie ou dans l'économie domestique, et une table des noms vulgaires. 2e édition. Paris, 1859, 1 vol. in-18.. 4 fr.

COSTE. — Histoire générale et particulière du développement des corps organisés, publiée sous les auspices du Ministre de l'instruction publique. Paris, 1848-1860, 3 volumes in-4, avec 50 planches grand in-plano, gravées en taille-douce, imprimées en couleur et accompagnées de contre-épreuves portant la lettre. Prix de la livraison : 52 fr.

4 livraisons sont en vente, texte et planches.

COURS ÉLÉMENTAIRE d'histoire naturelle, adopté par le Conseil supérieur de l'instruction publique et approuvé par Mgr l'Archevêque de Paris. 3 vol. gr. in-18.

Zoologie, par M. MILNE-EDWARDS, 10e édition, 1867, avec 484 fig. 6 fr.

Botanique, par M. A. DE JUSSIEU, 9e édition, 1862, avec 812 fig. 6 fr.

Minéralogie et **Géologie,** par M. BEUDANT, 10e édition, 1863, avec 800 figures.. 6 fr.

Géologie, séparément. 1 vol.................................. 4 fr.

CULLERIER (A.). — Précis iconographique des maladies vénériennes. Paris, 1866, 1 vol. gr. in-18 de 700 pages, et 74 planches gravées sur acier et coloriées..................................... 50 fr.

CUVIER. — Lettres de Georges Cuvier sur la politique et sur l'histoire naturelle, écrites en allemand, à son ami Pfaff, de 1788 à 1792; publiées pour la première fois en français. Traduction du docteur MARCHANT. Paris, 1858, 1 vol. grand in-18, avec 1 planche.... 1 fr.

CUVIER (Georges). — **Le Règne animal** distribué d'après son organisation, pour servir de base à l'Histoire naturelle des animaux et d'introduction à l'Anatomie comparée; nouvelle édition, accompagnée de planches gravées, représentant les types de tous les genres, les caractères distinctifs des divers groupes, et les modifications de structure sur lesquelles repose cette classification, publiée par une réunion de professeurs. 11 volumes de texte, et 11 atlas formant un ensemble de 993 planches, dont 13 sont doubles, dessinées d'après nature et gravées en taille-douce.
Les 11 tomes du texte, brochés en 10 volumes, les 993 planches et leurs explications réunies en 39 étuis :

Avec planches en noir........... 590 fr.
Avec planches coloriées.......... 1,310 fr.

Prix d'une demi-reliure de luxe en 10 volumes de texte et 10 atlas montés sur onglets, ensemble 20 volumes, dos et coins en maroquin, tranche supérieure dorée.. 170 fr.

CUZENT (G.). — **Épidémie de la Guadeloupe de 1865-1866.** 1 vol. in-8, avec plans, cartes et tableaux. Paris, 1867............ 4 fr.

DARWIN (Ch.). — **De l'origine des espèces** par sélection naturelle, ou Des lois de transformation des êtres organisés. Traduit en français par Mlle Clémence-Aug. Royer. 2e édition, revue et corrigée, avec une préface et des notes du traducteur. Paris, 1865, 1 vol. in-8.............. 7 fr. 50

DAUBRÉE (A.). — **Classification adoptée** pour la collection des roches du Muséum d'histoire naturelle de Paris. Paris, 1867, 1 broch. in-8. 2 fr.

DAUDIN (H.). — **Le nouveau théâtre d'agriculture**, ou Description raisonnée des travaux nécessaires à la culture des terres, accompagnée d'une étude comparative des auteurs latins qui ont écrit sur l'agriculture. Paris, 1864, 1 vol. in-8......................... 7 fr. 50

DE CANDOLLE (A.). — **Géographie botanique raisonnée.** Paris, 1855, 1 tome grand in-8 de 1,300 pages, divisé en 2 volumes compactes, avec 2 cartes coloriées................................ 25 fr.

DE CANDOLLE. — **Prodromus systematis naturalis regni vegetabilis,** *sive Enumeratio contracta ordinum, generum, specierumque plantarum hucusque cognitarum.* Paris, 1824-1864, in-8.

— En vente, les tom. I à XV, tom. XVI, IIe partie, fasc. 1er....... 250 fr.
Chacun des volumes depuis le tome VIII se vend................. 16 fr.
Le tome XIII a une deuxième partie vendue.................. 12 fr.
Le tome XV, 1re partie, 1864, 1 vol. in-8...................... 12 fr.
Le tome XV, 2e partie, 1 vol. de près de 1300 pages. Paris, 1866. 34 fr.
Tome XVI, partie IIe, fasc. 1er................................ 4 fr.

DE CANDOLLE. — **Index Candolleanus,** par Buek, contenant la table des genres, espèces et synonymes des vol. I à XIII inclusivement du *Prodromus.* 2 vol. in-8 .... 30 fr.

DEHÉRAIN. — **Annuaire scientifique** publié depuis 1862, avec la collaboration de MM. Ernouf, Guillemin, Marey, Margolé, Menu de Saint-Mesmin, S. Rayet, E. Saint-Edme, Schwöblé, Simonin, Tissandier, Trélat, E. Vignes, Worms, Zurcher; formant chaque année un volume in-18, avec figures dans le texte.

L'année 1868 (septième année) est en vente.
Chaque volume est vendu séparément.................... 3 fr. 50

*

DEJERNON (R.). — **La vigne en France et spécialement dans le Sud-Ouest.** Paris, 1867, 1 vol. in-8........................ 5 fr.

DELABARRE. — **Des accidents de la dentition** chez les enfants en bas âge, et des moyens de les combattre. Paris, 1851, 1 vol. in-8, avec fig. dans le texte.. 1 fr.

DELASIAUVE. — **Traité de l'épilepsie.** — HISTOIRE. — TRAITEMENT. — MÉDECINE LÉGALE. Paris, 1854, 1 vol. in-8........... 7 fr. 50

— **Journal de médecine mentale.** *Voy.* aux *Recueils périodiques*, page 32.

DELAUNAY. — **Cours élémentaire de mécanique.** 6e édit. Paris, 1866, 1 vol. grand in-18, avec 548 fig. dans le texte............. 8 fr.

DELAUNAY. — **Cours élémentaire d'astronomie.** 4e édition. Paris, 1865, 1 vol. grand in-18, avec 393 figures dans le texte. 7 fr. 50

DELAUNAY. — **Traité de mécanique rationnelle,** contenant les éléments de mécanique exigés pour l'admission à l'École polytechnique et toute la partie théorique du cours de mécanique et machines de cette école. 4e édit. Paris, 1866, 1 vol. in-8, avec 127 fig. dans le texte. 8 fr.

DELIOUX DE SAVIGNAC. — **Principes de la doctrine et de la méthode en médecine.** Introduction à l'étude de la pathologie et de la thérapeutique. Paris, 1861, 1 vol. in-8........................ 10 fr.

DELIOUX DE SAVIGNAC. — **Traité de la dysentérie.** Paris, 1863, 1 vol. in-8.. 8 fr.

DELORE. — **Du traitement des ankyloses;** examen critique des diverses méthodes. Paris, 1864, in-8, avec figures............. 2 fr. 50

DELORE et BERNE. — *Voy.* BERNE.

DEMARQUAY (M.). — **Traité des tumeurs de l'orbite.** Paris, 1860, 1 vol. in-8.. 7 fr.

DES ÉTANGS. — **Du suicide politique en France,** depuis 1789 jusqu'à nos jours. Paris, 1860, 1 vol. in-8...................... 3 fr.

DESHAYES (V.). — **Atlas de conchyliologie,** représentant 1,800 coquilles vivantes ou fossiles. 1 atlas grand in-8 de 130 planches, avec texte explicatif. Prix, avec figures en noir........................ 30 fr.

— *Le même*, fig. coloriées.. 72 fr.

Prix d'une demi-reliure, dos et coins en maroquin............... 4 fr.

DEVAY (FRANCIS). — **Du danger des mariages entre consanguins sous le rapport sanitaire.** 2e édition. 1 vol. in-18. 2 fr. 50

DEVERGIE (A.). — **Traité pratique des maladies de la peau.** 3e édition. Paris, 1863, 1 vol. in-8, avec fig. dans le texte....... 10 fr.

— *Le même,* avec atlas de planches coloriées .... 14 fr.

DICTIONNAIRE encyclopédique des sciences médicales, publié sous la direction du docteur DECHAMBRE, par une réunion de médecins civils et militaires, membres des académies, professeurs, agrégés, médecins et chirurgiens des hôpitaux, écrivains de la presse médicale, etc., etc. — Le *Dictionnaire encyclopédique des sciences médicales* est publié par demi-volume en deux séries simultanées : la première commençant par la lettre A, la seconde par la lettre L.

1re série, 16 demi-volumes en vente.

Chaque demi-volume, 400 pages, gr. in-8 compacte, avec fig... 6 fr.

DICTIONNAIRE général de médecine et de chirurgie vétérinaires et des sciences qui s'y rattachent, par MM. Lecoq, Rey, Tisserant et Tabourin, professeurs à l'École impériale vétérinaire de Lyon. — Ouvrage adopté par les écoles vétérinaires de France. Paris, 1850, 1 fort volume grand in-8, à 2 colonnes.................. 15 fr.

DICTIONNAIRE général des sciences théoriques et appliquées, comprenant : les mathématiques, la physique et la chimie, la mécanique et la technologie, l'histoire naturelle et la médecine, l'économie rurale et l'art vétérinaire, par MM. les professeurs Privat-Deschanel et Ad. Focillon, avec la collaboration d'une réunion de savants, d'ingénieurs et de professeurs. 2 volumes in-8 imprimés en 2 colonnes de chacun 1200 pages avec près de 3,000 figures............................ 30 fr.

DIDAY (F.). — De la syphilis des nouveau-nés et des enfants à la mamelle. Paris, 1854, 1 vol. in-8.................................. 7 fr.

DIEU (S.). — Traité de matière médicale et de thérapeutique, précédé de Considérations générales sur la zoologie, et suivi de l'Histoire des eaux naturelles. Paris, 1847-1854, 4 vol. in-8............... 10 fr.

DINAN. — Construction des formules de transport pour l'exécution des terrassements. Paris, 1859, 1 vol. in-8... 3 fr.

DOLBEAU. — Leçons de clinique chirurgicale professées à l'Hôtel-Dieu de Paris et recueillies par le Dr Besnier. Paris, 1866, 1 vol. in-8. 7 fr.

D'ORBIGNY (Alcide). — Cours élémentaire de paléontologie et de géologie stratigraphiques. Paris, 1852, 2 tomes publiés en 3 volumes in-18, avec 1,046 gravures dans le texte et accompagnés d'un atlas in-4° de 17 tableaux; cartonnés......................... 15 fr.

D'ORBIGNY (Alcide). — Prodrome de paléontologie stratigraphique universelle, faisant suite au Cours élémentaire de paléontologie et de géologie stratigraphiques. 3 vol. gr. in-18 jésus...... 12 fr.

D'ORBIGNY (Alcide). — Paléontologie française. Description de tous les animaux mollusques et rayonnés fossiles de France, avec des figures de toutes les espèces, lithographiées d'après nature.

— TERRAIN CRÉTACÉ publié en 260 livraisons à 1 fr. 25, et comprenant : Céphalopodes, Gastéropodes, Lamellibranches, Brachiopodes, Bryozoaires, Échinoïdes irréguliers. Paris, 1840-1860, 6 vol. in-8 de texte et 1,018 planches en 6 atlas cartonnés......................... 325 fr.

— TERRAIN JURASSIQUE publié en 110 livraisons à 1 fr. 25, et comprenant : Céphalopodes, Gastéropodes. Paris, 1842-1860, 2 vol. in-8 de texte et 432 planches en 2 atlas cartonnés......................... 140 fr.

— **PALÉONTOLOGIE FRANCAISE.** — Continuation de l'ouvrage de d'Orbigny par une réunion de paléontologistes, sous la direction d'un comité spécial, composé de membres de la Société géologique de France.

Cette suite paraît pour les *terrains Crétacés* et pour les *terrains Jurassiques* par livraisons de douze planches, avec le texte correspondant.

Prix de la livraison.. 6 fr.

24 livraisons sont en vente du Terrain Crétacé et 12 du Terrain Jurassique.

DORVILLE. — Monographie de la pile électrique, ses dispositions actuelles, ses applications diverses et ses perfectionnements les plus récents. Paris, 1857, in-8.. 1 fr. 25

DOYON (A.). — Uriage et ses eaux minérales. Paris, 1855, 1 vol. in-18, orné de 6 vignettes gravées sur bois.................. 3 fr. 50

DOYON. — De l'herpès récidivant des parties génitales. Paris, 1868, 1 vol. in-8.. 3 fr. 50

DRION (Ch.) et **FERNET** (Em.). — **Traité de physique élémentaire,** suivi de problèmes. 2e édition. 1 vol. grand in-18, avec 673 figures dans le texte.. 7 fr.

L'introduction de cet ouvrage dans les écoles publiques est autorisée par décision de S. Exc. M. le Ministre de l'Instruction publique et des Cultes.

DU BREUIL (A.). — **Instruction élémentaire sur la conduite des arbres fruitiers.** Greffe, — taille, — restauration des arbres mal taillés ou épuisés par la vieillesse, — culture, — récolte et conservation des fruits. 7e édition. Paris, 1868, 1 vol. in-18, avec 191 fig. 2 fr. 50

DU BREUIL (A.). — **Arbres et arbrisseaux à fruits de table.** 6e édition du *Cours d'arboriculture.* Paris, 1868, 1 vol. in-18, avec 573 figures intercalées dans le texte.. 8 fr.

DU BREUIL (A.). — **Manuel d'arboriculture des Ingénieurs.** Plantations d'alignement forestières et d'ornement, boisement des dunes, des talus, haies vives, des parcelles excédantes des chemins de fer. 2e édition. Paris, 1865, 1 vol. in-18, avec 234 figures dans le texte. 3 fr. 50

DU BREUIL (A.). — **Culture perfectionnée** et moins coûteuse du vignoble. Paris, 1863, 1 vol. in-18, avec 144 figures........... 3 fr. 50

DU VIVIER. — De la mélancolie. Paris, 1864, 1 vol. gr. in-18. 3 fr.

EDWARDS (Milne-). — **Cours élémentaire d'histoire naturelle,** Zoologie. 10e édition. Paris, 1867, 1 vol. in-18, avec 484 fig... 6 fr.

EDWARDS (Milne-). — **Introduction à la zoologie générale,** ou Considérations sur les tendances de la nature dans la constitution du règne animal. Première partie. 1853. 1 vol. grand in-18....... 2 fr. 25

EDWARDS (Milne-). — **Notions préliminaires de zoologie.** 1853. 1 vol. grand in-18, avec 352 figures.. 8 fr.

EDWARDS (Milne-). — **Leçons sur la physiologie et l'anatomie comparée de l'homme et des animaux.**

L'ouvrage comprendra environ douze volumes grand in-8 du prix de 9 fr.
En vente, les volumes I à IX, première partie........................ 77 fr.

Le complément de l'ouvrage sera publié par demi-volumes de 6 mois en 6 mois.

EDWARDS (Alph. Milne-). — **De la famille des Solanacées.** Paris, 1864, gr. in-8, avec 2 planches coloriées........................ 4 fr.

— **Histoire des Crustacés Podophthalmaires fossiles.** Tome Ier, grand in-4, accompagné de 36 planches........................ 35 fr.

EDWARDS (Alph. Milne-). — **Précis d'Histoire naturelle.** Zoologie — Botanique — Géologie. (*de la collection du Baccalauréat ès sciences.*) 2e édition, Paris, 1868, in-8, avec fig........................ 3 fr.

EDWARDS (Alph. Milne-). — **Recherches anatomiques et paléontologiques** pour servir à l'histoire des oiseaux fossiles de la France. Ouvrage qui a obtenu le grand prix des sciences physiques en 1866.

L'ouvrage paraît par livraisons mensuelles de deux ou trois feuilles de texte et 5 planches in-4° à partir du 15 décembre 1866.

Il sera complet en 40 livraisons.

Prix de chaque livraison.. 5 fr.

17 sont en vente.

ÉLY. — Chronique médicale de l'année 1863. Paris, 1864, 1 vol. grand in-18.. 2 fr.

ETTINGSHAUSEN (Constantin d') et **ALOIS POKORNY. — Physiotypia plantarum austriacarum.** *L'Impression naturelle* appliquée à la représentation des plantes vasculaires et particulièrement à celle de leur nervation. 500 planches in-folio et 30 planches in-4. Imprimé aux frais de l'État par l'Imprimerie impériale et royale d'Autriche. Vienne, 1856, 5 vol. in-folio et 1 vol. in-4.............................. 700 fr.

EVANS. — Des institutions sanitaires pendant le conflit austro-prussien-italien, suivi d'un essai sur les voitures d'ambulance. Paris, 1867, 1 vol. in-8.. 5 fr.

FAVRE (Alph.). — **Recherches géologiques** dans les parties de la Savoie, du Piémont et de la Suisse voisines du mont Blanc. Paris, 1867, 3 vol. in-8, avec un atlas de 32 planches in-folio, cartonnés.... 60 fr.

FAVRE. — Carte géologique des parties de la Savoie, du Piémont et de la Suisse voisines du mont Blanc. Une feuille gr. in-folio, coloriée.. 15 fr.

FERNET (E.). — *Voy.* Drion et Fernet, p. 12.

FERNET.— Précis de Physique (*de la collection du Baccalauréat ès sciences*). 2e édition, rédigée conformément aux nouveaux progammes. Paris, 1868, 1 vol. in-18, avec figures dans le texte............. 3 fr.

FOLLIN et **DUPLAY. — Traité élémentaire de pathologie externe.** 4 vol. grand in-8, avec figures dans le texte.

En vente, les tomes I et II, par M. Follin........................ 23 fr.

FONSSAGRIVES (J. B.). — Entretiens familiers sur l'hygiène. Paris, 1867, 1 vol. in-18.............................. 4 fr.

FONTERET (A. L.). — Hygiène physique et morale de l'ouvrier dans les grandes villes en général, et dans la ville de Lyon en particulier. Paris, 1858, 1 vol. grand in-18........................ 3 fr.

FORGET (A. M.). — Des anomalies dentaires et de leur influence sur la production des maladies des os maxillaires. Paris, 1859, 1 vol. in-4, avec 6 planches.. 3 fr.

FOUCHER.— Leçons sur la cataracte, professées à l'hôpital Saint-Louis, par le docteur Foucher, recueillies par MM. Bousseau et Vaslin. Paris, 1868, 1 vol. in-8, avec figures dans le texte............. 5 fr.

GAUTIER (A.). — Introduction philosophique à l'étude de la géologie. Paris, 1853, 1 vol. in-8................................ 3 fr.

GAVARRET. — Physique médicale. De la chaleur produite par les êtres vivants. Paris, 1855, 1 vol. gr. in-18, avec figures dans le texte. 6 fr.

GAVARRET. — Traité d'électricité. Paris, 1857-1858, 2 vol. in-18, avec 448 figures.. 16 fr.

GAVARRET. — Télégraphie électrique. Paris, 1861, 1 vol. in-18, avec 100 fig. dans le texte...................................... 5 fr.

GAZETTE HEBDOMADAIRE de médecine et de chirurgie. 1re série, publiée de 1854 à 1863, par le docteur Dechambre. 10 vol. grand in-4... 250 fr.

Pour la deuxième série, voir aux *Publications périodiques.*

GEOFFROY SAINT-HILAIRE (Isidore). — **Histoire naturelle générale des règnes organiques**, principalement étudiée chez l'homme et les animaux. Paris, 1854 à 1862, 3 vol. in-8°......... 24 fr.

GEOFFROY SAINT-HILAIRE (Isidore).— **Lettres sur les substances alimentaires, et particulièrement sur la viande du cheval**. Paris, 1856, 1 vol. grand in-18.......................... 1 fr.

GERHARDT (C.) et **CHANCEL.** — **Précis d'analyse chimique qualitative**. Ouvrage contenant : les opérations et les manipulations générales de l'analyse, la préparation et l'usage des réactifs, les caractères des acides et des bases. — Les essais au chalumeau. — La marche de l'analyse qualitative, la détermination des sels, l'essai des eaux potables, l'analyse des eaux minérales, l'analyse des mélanges gazeux, l'analyse immédiate des matières végétales et animales, la recherche, des poisons, l'exposition de l'analyse spectrométrique. 3e édition. Paris, 1867, 1 vol. grand in-18, avec figures.......................... 7 fr. 50

GERHARDT (C.) et **CHANCEL.** — **Précis d'analyse chimique quantitative**. Ouvrage contenant : la description des appareils et des opérations générales de l'analyse quantitative, les méthodes de dosage et de séparation des bases et des acides, l'analyse par les liqueurs titrées, l'analyse organique, l'analyse des gaz, l'analyse des eaux minérales, des cendres, des terres arables, l'exposition du calcul des analyses. 2e édit. Paris, 1864, 1 vol. grand in-18, avec figures................ 7 fr. 50

GIRARD DE CAILLEUX. — **Spécimen du budget d'un asile d'aliénés**, et possibilité de couvrir la subvention départementale au moyen d'un excédant équivalent de recette. Paris, 1855, 1 vol. in-4, cartonné, avec tableaux.. 8 fr.

GIRARDIN. — **Leçons de chimie élémentaire appliquée aux arts industriels.** 4e édition entièrement refondue. Paris, 1860-1861, 2 vol. grand in-8, avec figures et échantillons dans le texte.... 30 fr.

Chaque volume est vendu séparément........................... 15 fr.

GIRARDIN. — **Chimie générale et appliquée**, à l'usage des établissements d'enseignement spécial.

En vente, première année, 1 vol. petit in-8, avec 86 fig..... 1 fr. 60

— Deuxième année, 1 volume petit in-8, avec figures............ 3 fr. 50

Le cours complet comprendra *quatre années*. La troisième et la quatrième année paraitront avant les vacances de 1868.

GIRARDIN. — **Des fumiers et autres engrais animaux.** Sixième édition, revue, corrigée et augmentée. Paris, 1864, 1 vol. in-16, avec 62 figures dans le texte.................................. 2 fr. 50

GIRARDIN et **DU BREUIL.** — **Traité élémentaire d'agriculture**. Paris, 1863, deuxième édition. 2 vol. in-18, avec 955 figures dans le texte.. 16 fr.

GLOGER. — **De la nécessité de protéger les animaux utiles** pour prévenir naturellement les dégâts causés par les souris et les insectes. Paris, 1863, 1 brochure in-18............................ 80 c.

GODARD. — **Égypte et Palestine.** — **Observations scientifiques et médicales**, avec une préface par M. Ch. Robin. Paris, 1867, 1 vol. grand in-8, avec un atlas in-4° de 27 planches lithographiées d'après les dessins de l'auteur.. 24 fr.

GOUREAU (C.). — **Les insectes nuisibles aux arbres fruitiers, aux plantes potagères, aux céréales et aux plantes fourragères.** Paris, 1862, 1 vol. in-8........................ 5 fr.

GOUREAU. — **Les insectes nuisibles aux forêts et aux arbres d'avenue.** Paris, 1867, 1 vol. in-8........................ 5 fr.

— **Les insectes nuisibles à l'homme, aux animaux et à l'économie domestique.** Paris, 1866, 1 vol. in-8................ 4 fr.

GRATIOLET. — **Recherches sur l'anatomie de l'hippopotame**, publiées par les soins du docteur Alix. 1 vol. in-4, avec 13 pl. lithographiées.. 35 fr.

GRÉARD (O.). — **Littérature.** 1 vol. in-18 (extrait du Baccalauréat ès sciences).. 1 fr. 25

GRISOLLE. — **Traité de pathologie interne.** 9e édition, considérablement augmentée. Paris, 1865, 2 volumes gr. in-8...... 18 fr.

GUIRAUDET. — **Principes de mécanique expérimentale et de mécanique appliquée**, à l'usage des établissements d'enseignement spécial.

En vente. **Première partie** (troisième année de l'enseignement). 1 vol. petit in-8, avec figures.................................. 2 fr. 80

La seconde partie paraîtra avant les vacances de 1868.

Chacune des années du cours formera un volume séparé.

GUYOT (Jules). — **Études des vignobles de France**, pour servir à l'enseignement mutuel de la viticulture et de la vinification française. 3 vol. gr. in-8, avec environ 1,200 gravures dans le texte......... 30 fr.

HAY (D. R.). — **La beauté géométrique de la forme humaine,** précédée d'un système de proportion esthétique applicable à l'architecture et aux autres arts plastiques. Édimbourg, 1851, 1 vol. in-4, avec 16 planches gravées en taille-douce et une figure dans le texte... 20 fr.

HEISER. — **Traité de gymnastique raisonnée au point de vue orthopédique, hygiénique et médical,** ou Cours d'exercices appropriés à l'éducation physique des deux sexes. Paris, 1854, 1 vol. in-8, avec 123 figures.. 6 fr.

HELMHOLTZ. — **Optique physiologique**, traduite par Ém. Javal et Th. Klein. 1 vol. gr. in-8, avec 215 fig. dans le texte et un atlas de 11 planches.. 30 fr.

HELMHOLTZ. — **Théorie physiologique de la musique**, fondée sur l'étude des sensations auditives; traduit de l'allemand par M. G. Guéroult, avec le concours pour la partie musicale de M. Wolf. Paris, 1868, 1 vol. in-8, avec figures dans le texte.......................... 13 fr.

HERPIN (de Metz). — **Études médicales et statistiques** sur les principales sources de France, d'Angleterre et d'Allemagne; avec des tableaux synoptiques et comparatifs d'analyses chimiques des eaux classées d'après les analogies de leur composition et de leurs effets thérapeutiques. Paris, 1856, 1 vol. grand in-18, avec tableaux................ 2 fr.

HISTOIRE NATURELLE du Jura et des départements voisins. I. Géologie, par le F. Ogérien. Paris, 1865, in-8, avec 400 fig., une carte climatérique et une carte géologique coloriées........ 15 fr.

II. Botanique, par Michalet. Paris, 1864, 1 vol. in-8............. 5 fr.
III. Zoologie vivante, par le F. Ogérien. Paris, 1863, 1 vol. in-8, avec 211 figures... 7 fr.

HIRSCHFELD (Ludovic). — **Traité et iconographie du système nerveux** et des organes des sens de l'homme, avec leur mode de préparation. Deuxième édition. Paris, 1865, 1 vol. in-8, avec un atlas de 92 planches, dessinées d'après les préparations de l'auteur par M. Léveillé. Le texte, 1 vol. in-8. L'atlas, 1 vol. in-4 colombier.

Noir........ 60 fr. Colorié...... 110 fr.

Prix de la reliure demi-maroquin.............................. 10 fr.
Le texte seul.. 12 fr.
Voy. page 2. — *Atlas d'Anatomie descriptive.*

HUGUENY. — **Recherches sur la composition chimique** et les propriétés qu'on doit exiger des eaux potables. Paris, 1865, grand in-8.. 3 fr.

ISNARD (Ch.). — **De l'arsenic** dans la pathologie du système nerveux, son action dans l'état nerveux, la chlorose, etc. Étude sur la médication arsenicale. Paris, 1865, in-8............................ 4 fr.

JAMES (Constantin). — **Guide pratique aux eaux minérales** françaises et étrangères. 6e édition, avec une carte itinéraire des eaux et les principaux établissements thermaux. Paris, 1867, 1 fort volume grand in-18 de 600 pages, broché.............................. 7 fr. 50
— *Le même*, cartonné...................................... 9 fr.

JAVAL. — **Du strabisme dans ses applications à la pathologie de la vision.** Paris, 1868, 1 vol. in-8............... 2 fr. 50

JAVAL. — *Voy.* Helmholtz.

JOIGNEAUX (P.). — **Conseils à la jeune fermière.** Paris, 1861. 2e édition. 1 vol. grand in-18, avec figures dans le texte....... 1 fr.

JOIGNEAUX (P.), sous le pseudonyme de P. J. de Varennes. — **Les veillées de la ferme du Tourne-Bride,** ou Entretiens sur l'agriculture, l'exploitation des produits agricoles et l'arboriculture. 2e édition. Paris, 1867, 1 vol. in-12, avec figures dans le texte............... 1 fr.

JOIGNEAUX (P.). — **Le Livre de la ferme et des maisons de campagne,** publié sous la direction de M. P. Joigneaux, avec la collaboration des principaux agronomes. Seconde édition. 2 vol. grand in-8 jésus, de 2,160 pages, imprimés sur deux colonnes, avec 1,720 figures intercalées dans le texte..................................... 32 fr.

JOIGNEAUX. — **Traité des graines** de la grande et de la petite culture. Paris, 1867, 1 vol. in-18, avec figures..................... 3 fr.

JOIRE (A.). — **Introduction à l'étude de la physiologie.** Examen des questions fondamentales sur la vie dans l'organisation animale. Paris, 1864, 1 vol. in-18.................................. 3 fr.

JOURDIER (A.). — **L'agriculture à l'Exposition universelle de Londres en 1862.** Paris, 1863, 1 volume in-18........... 1 fr.
— Voy. *Catéchisme d'agriculture.*

JOURNAL de la Ferme et des Maisons de campagne, revue

complémentaire du *Livre de la Ferme*, publié du 1er janvier 1865 au 31 décembre 1866. 4 beaux volumes grand in-8°, avec nombreuses illustrations, par MM. JOIGNEAUX, ANDRÉ, BALTET, FISCHER, KOLTZ, PONS-TANDE, etc., etc. — Prix des 4 volumes........................ 48 fr.

Chacun est vendu séparément................................ 12 fr.

JOURNAL de l'agriculture, fondé et dirigé par J. A. BARRAL, fusionné à partir du 1er janvier 1867 avec le *Journal de la Ferme*. (Voir aux *Publications périodiques*, p. 32.).

JOURNAL de pharmacie et de chimie. — Voy. les *Publications périodiques*, p. 32.

JUSSIEU (DE). — **Cours élémentaire d'histoire naturelle. — Botanique.** Paris, 1862, 9e édit. 1 vol. avec 812 fig. dans le texte.... 6 fr.

KOLTZ. — **Traité de pisciculture pratique**, ou Des Procédés de multiplication et d'incubation naturelle et artificielle des poissons d'eau douce. 3e édit. Paris, 1866, 1 vol. in-18, avec nombreuses fig. 2 fr. 50

KÖLLIKER. — **Éléments d'histologie humaine**; 2e édition entièrement remaniée et accompagnée d'un grand nombre de figures nouvelles; — traduction par le docteur Marc Sée d'après la 5e édition allemande. Paris, 1868, 1 vol. gr. in-8, avec fig............................ 14 fr.

KUHLMANN (FRÉD.). — **Expériences chimiques et agronomiques.** Paris, 1847, 1 vol. in-8.................................. 3 fr. 50

KUHN (H.). — **De la première dentition des enfants**, maladies qu'elle détermine, moyens préventifs et remèdes à employer. Hygiène de la bouche. Paris, 1865, brochure in-8............................ 1 fr. 50

LACAZE-DUTHIERS. — **Histoire de l'organisation, du développement, des mœurs et des rapports zoologiques du dentale.** Paris, 1858, 1 vol. in-4, avec 14 planches gravées.. 25 fr.

LAURENT (ARM.). — **Étude médico-légale sur la simulation de la folie.** Considérations cliniques et pratiques à l'usage des médecins experts, des magistrats et des jurisconsultes. Paris, 1866, 1 vol. in-8. 6 fr.

LAPASSE (VICOMTE DE). — **Essai sur la conservation de la vie**, suivi d'un formulaire. Paris, 1860, 1 vol. in-8.............. 7 fr. 50

LAPASSE (VICOMTE DE). — **Hygiène de longévité**, guérison des migraines, maux d'estomac, maux de nerfs et vapeurs. Suite à l'Essai sur la conservation de la vie. Paris, 1861, 1 vol. in-18................ 2 fr.

LEFORT (L.). — **Des Maternités.** Études sur les Maternités et les institutions charitables d'accouchement à domicile dans les principaux États de l'Europe. Paris, 1866, 1 vol. in-4, avec 11 pl............ 18 fr.

LEFORT (J.). — **Chimie des couleurs** pour la peinture à l'eau et à l'huile, comprenant l'historique, les propriétés physiques et chimiques, la préparation, la falsification, l'action toxique et l'emploi des couleurs anciennes et nouvelles. Paris, 1855, 1 vol. gr. in-18................. 4 fr.

LEFORT (J.). — **Traité de chimie hydrologique**, comprenant des notions générales d'hydrologie, l'analyse des eaux douces et des eaux minérales. Paris, 1859, 1 vol. grand in-8, avec figures..... 8 fr.

LEHMANN. — **Précis de chimie physiologique animale.** Paris, 1855, 1 vol. in-18, avec 26 figures dans le texte........ 2 fr.

LE MAOUT (E.). — **Leçons élémentaires de botanique**, fondées sur l'analyse de 50 plantes vulgaires et formant un traité complet d'organographie et de physiologie végétales. 3e édition, 1867. 1 vol. gr. in-8, avec atlas de 50 planches et 750 fig. dans le texte.
Avec l'atlas noir......... 12 fr. Avec l'atlas colorié...... 16 fr.

LENOIR (A.), **SÉE** (Marc) et **TARNIER** (S.). — **Atlas de l'art des accouchements**, contenant 105 planches dessinées d'après nature, et lithographiées par M. E. Beau, avec un volume de texte imprimé sur 2 colonnes. Paris, 1865, 2 vol. grand in-8 jésus, cartonnés.. 60 fr.
Prix d'une reliure en demi-maroquin........................ 10 fr.

LEPELLETIER (de la Sarthe). — **Traité complet de physiognomonie**, ou L'homme moral positivement révélé par l'étude raisonnée de l'homme physique, avec des considérations sur les tempéraments, les caractères, leurs influences réciproques. Paris, 1864, 1 vol. in-8. 7 fr. 50

LEROY (Em.). — **De l'éducation des enfants**. Conseils aux parents pour l'hygiène à suivre. Paris, 1862, 1 vol. in-18............... 2 fr.

LEVASSEUR (E.). — **Précis d'histoire de France**. 1 vol. in-18 (extrait du Baccalauréat ès sciences). Paris, 1865............. 3 fr. 50

LEVASSEUR (E.). — **Éléments de géographie**. 1 vol. in-18 (extrait du Baccalauréat ès sciences). Paris, 1865............. 1 fr. 75

LEYMERIE (A.). — **Cours de minéralogie**. Deuxième édition. Paris, 1866, 2 vol. in-8, avec 352 fig........................... 12 fr.

LEYMERIE. — **Éléments de minéralogie et de géologie**, comprenant des notions de Lithologie et un lexique où se trouvent indiqués les caractères génériques des fossiles. 2e édit. 1 vol. in-18 en deux parties renfermant 300 vignettes.............................. 9 fr.

LIEBAULT (A. A.). — **Du sommeil et des états analogues**, considérés surtout au point de vue de l'action du moral sur le physique. Paris, 1866, 1 vol. in-8...................................... 6 fr.

LIEBIG (J.). — **Traité de chimie organique**; édit. française, revue et considérablement augmentée par l'auteur, et publiée par Ch. Gerhardt. Paris, 1841-1844, 3 vol. in-8.............................. 25 fr.

LIÉGEOIS. — **Traité de physiologie** (*sous presse*).

LIÉTARD (G.). — **Lettres historiques sur la médecine chez les Hindous**. Brochure in-8. Paris, 1863................. 2 fr. 50

L'IMITATION DE JÉSUS-CHRIST, suivie de la traduction en vers par P. Corneille. 1 volume grand in-folio de 872 pages. Imprimerie Impériale, 1855 (Exposition universelle).
Prix de l'exemplaire...................................... 4,000 fr.

Prix d'une reliure en maroquin plein exactement semblable à celle faite pour S. M. l'Empereur.. 1,000 fr.

L'*Imitation de Jésus-Christ* n'a été tirée qu'à *cent trois* exemplaires et *deux* exemplaires de passe. — Chaque exemplaire est numéroté.

L'Empereur a disposé des exemplaires numérotés de 1 à 73.

Nous nous sommes rendus acquéreurs du reste des exemplaires numérotés de 74 à 103.

LE LIVRE de la Ferme et des Maisons de campagne. — *Voy*. Joigneaux, p. 17.

LE LIVRE de la nature, ou Leçons élémentaires de physique, d'astronomie, de chimie, de minéralogie, de géologie, de botanique, de physique

et de zoologie, par le docteur F. SCHOEDLER ; traduit de l'allemand par le professeur AD. SCHELER. 2 vol. in-8, publiés en 6 fascicules, illustrés d'environ 1,000 figures dans le texte. Prix de l'ouvrage complet...... 15 fr.
Chaque fascicule est vendu séparément.................... 2 fr. 50

LIVRET DU MUSÉE D'ANATOMIE NORMALE de la Faculté de médecine de Paris (Musée ORFILA). Paris, 1863, 1 vol. in-18..... 50 c.

MACKENZIE (W.). — Traité pratique des maladies de l'œil ; traduit sur la quatrième édition et augmenté d'annotations, par MM. les docteurs WARLOMONT et TESTELIN. Paris, 1857-1866, 3 volumes grand in-8 compactes, avec figures.............................. 45 fr.
Le tome III, comprenant l'exposé de toutes les découvertes et de tous les faits intéressants relatifs à l'ophthalmologie qui se sont produits depuis 1857, et un précis d'ophthalmocopie par M. GIRAUD-TEULON, est vendu séparément.. 15 fr.

MARDUEL. — De la résection sous-capsulo-periostée de l'articulation du coude. Paris, 1867, 1 vol. in-8............ 3 fr.

MARIÉ-DAVY. — Recherches théoriques et expérimentales sur l'électricité considérée au point de vue mécanique. Paris, 1862, fascicules 1 et 2. Prix de chaque fascicule............ 3 fr.

MARIÉ-DAVY. — Météorologie. Les mouvements de l'atmosphère et des mers, considérés au point de vue de la prévision du temps. Paris, 1866, 1 vol. grand in-8, avec figures et 24 cartes coloriées......... 10 fr.

MARSHALL-HALL. — Aperçu du système spinal diastaltique, ou Système des actions reflexes dans ses applications à la physiologie et à la pathologie. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec figures et tableaux.. 2 fr.

MAS. — Voir aux *Publications périodiques*, p. 32, LE VERGER.

MATTEUCCI. — Leçons sur les phénomènes physiques des corps vivants. Paris, 1847, 1 vol. gr. in-18, avec 18 fig..... 3 fr. 50

MAUDUIT. — Précis d'arithmétique, *de la collection du Baccalauréat ès sciences.* 2e édit., rédigée conformément aux nouveaux programmes. Paris, 1867, 1 vol. gr. in-18.......................... 1 fr. 20

MAUDUIT. — Précis d'Algèbre, *de la collection du Baccalauréat ès sciences.* 2e édition, rédigée conformément aux nouveaux programmes. Paris, 1867, 1 vol. in-18................................ 1 fr. 40

MAUMENÉ (E. J.). — Indications théoriques et pratiques sur le travail des vins, et en particulier des vins mousseux. Paris, 1858, 1 vol. grand in-8, avec 100 figures dans le texte.................. 12 fr.

MIALHE. — Chimie appliquée à la physiologie et à la thérapeutique. Paris, 1856, 1 vol. in-8.............................. 9 fr.

MIGNOT (A.). — Traité de quelques maladies pendant le premier âge. Paris, 1859, 1 vol. in-8.......................... 5 fr.

MOLESCHOTT. — De l'alimentation et du régime. Traité populaire. Paris, 1858, 1 vol. grand in-18......................... 1 fr.

MONCKHOVEN (V.). — Traité d'optique photographique, comprenant la description des objectifs et appareils d'agrandissement. Paris, 1866, 1 vol. in-12, avec fig. dans le texte et cinq planches.... 4 fr.

MONCKHOVEN (V.).—Traité général de photographie, comprenant tous les procédés connus jusqu'à ce jour, suivi de la théorie de la photographie et de son application aux sciences d'observation. 5e édition, refondue et comprenant un chapitre spécial sur les agrandissements photographiques. Paris, 1865, 1 vol. grand in-8, avec 22 figures dans le texte.. 10 fr.

MOREAU (de Tours). — **La psychologie morbide dans ses rapports avec la philosophie de l'histoire.** Paris, 1859, 1 vol. in-8, avec une planche.. 8 fr.

MOREL (A.). — Traité des maladies mentales. Paris, 1860, 1 vol. grand in-8 compacte.. 13 fr.

MOREL. — Traité de la médecine légale des aliénés. Historique depuis les temps anciens jusqu'à nos jours. Paris, 1866, 1 vol. in-8. 2 fr. 50

MONTAGNA. — De la houille dans le royaume d'Italie; mémoire sur de nouvelles conséquences géologiques et industrielles; traduction faite par L. Auverman. 1 vol. in-8, avec 9 planches.............. 5 fr.

MOURE (A.) et MARTIN. — Vade-mecum du médecin praticien, précis de thérapeutique spéciale, de pharmaceutique, de pharmacologie. Paris, 1845, 1 beau vol. grand in-18 compacte......... 3 fr. 50

— *Le même*, demi-reliure.. 5 fr.

NIEPCE de SAINT-VICTOR. — Traité pratique de gravure héliographique sur acier et sur verre, avec un portrait de l'auteur gravé par ses procédés. Paris, 1856, petit in-4.................... 5 fr.

NORMANDY (A.). — Tableaux d'analyse chimique; ouvrage présentant toutes les opérations de l'analyse qualitative, accompagné de nombreuses observations pratiques. Paris, 1858, 1 vol. in-4, avec figures, relié en toile.. 25 fr.

OBERLIN.— Aperçu systématique des végétaux médicinaux, des végétaux alimentaires ainsi que des végétaux employés dans les arts et dans l'industrie. Paris, 1867, 1 vol. in-8........................ 2 fr.

ODLING. — Manuel de chimie théorique et pratique. Édition française publiée avec l'autorisation de l'auteur par M. Edmond Willm. Première partie, *Métalloïdes*. Paris, 1866, 1 vol. in-8, avec figures dans le texte.. 7 fr.

OLLIER. — Traité expérimental et clinique de la génération des os et de la production artificielle du tissu osseux. Ouvrage qui a obtenu le grand prix de chirurgie. Paris, 1867, 2 vol. in-8, avec figures dans le texte et planches en taille-douce.................... 30 fr.

OULMONT (W.). — Du veratrum viride et de son action physiologique et thérapeutique. Première partie. Paris, 1868, in-8.. 1 fr.

PALÉONTOLOGIE FRANÇAISE. (*Voy.* d'Orbigny, pag. 12.)

PARCHAPPE (Max.). — Du cœur, de sa structure et de ses mouvements, ou Traité anatomique, physiologique et pathologique des mouvements du cœur de l'homme; contenant des recherches anatomiques et physiologiques sur le cœur des animaux vertébrés. Paris, 1848, 1 vol. in-8, avec un atlas de 10 planches in-4........................ 12 fr.

PARCHAPPE (MAX.). — **Du siége commun de l'intelligence,** de la volonté et de la sensibilité chez l'homme. 1re partie : *Preuve pathologique.* Paris, 1856, in-8.. 2 fr. 50

PARCHAPPE (M.). — **Sur les différents modes d'assistance des aliénés.** Paris, 1865, 1 broch. in-8.................... 1 fr. 25

PASTEUR (L.). — **Études sur le vin**, ses maladies, causes qui les provoquent, procédés nouveaux pour le conserver et pour le vieillir. Paris, 1866, 1 vol. in-8, avec planches coloriées, imprimé à l'Imprimerie Impériale.. 15 fr.

PASTEUR (L.). — **Études sur le vinaigre**, sa fabrication, ses maladies, moyens de les prévenir, nouvelles observations sur la conservation des vins par la chaleur. Paris, 1868, 1 vol. in-8..................... 4 fr.

PAULET ET **SARAZIN**. — **Traité d'anatomie topographique,** comprenant les principales applications à la pathologie et à la médecine opératoire. 2 vol. d'atlas d'ensemble 164 planches tirées en couleur, avec un volume de texte d'environ 800 pages, par V. PAULET, professeur agrégé, chef des travaux anatomiques à l'École impériale du Val-de-Grâce. 164 fr.

Voir page 2, *Anatomie topographique,* pour les conditions de la souscription.

PAUL D'ÉGINE (Chirurgie de), texte grec, restitué et collationné sur tous les manuscrits de la Bibliothèque impériale, accompagné de variantes de ces manuscrits et de celles des deux éditions de Venise et de Bâle, ainsi que de notes philologiques et médicales, avec traduction française en regard, précédé d'une introduction par le docteur *René Briau.* Paris, 1855, 1 vol. grand in-8.. 9 fr.

PAYER (J.). — **Éléments de botanique.** Paris, 1857, première partie, *Organographie.* 1 volume grand in-18, avec 600 figures intercalées dans le texte.. 5 fr.
L'ouvrage sera continué par M. le professeur Baillon.

PAYER (J.). — **Traité d'organogénie comparée de la fleur.** Paris, 1857, 1 vol. grand in-8, avec un atlas de 154 planches gravées en taille-douce. 2 volumes, demi-reliure maroquin, les planches montées sur onglets... 160 fr.

PÉCLET (E.). — **Traité de la chaleur considérée dans ses applications.** 3e édition, entièrement refondue et accompagnée de 650 figures dans le texte. Paris, 1860-1861, 3 vol. grand in-8....... 42 fr.

PELOUZE ET **FREMY**. — **Abrégé de chimie.** Cinquième édition, conforme aux nouveaux programmes de l'enseignement scientifique des lycées. Paris, 1866, 3 vol. grand in-18, avec 174 figures intercalées dans le texte.. 6 fr.

On peut avoir séparément :

1re partie. — CORPS SIMPLES NON MÉTALLIQUES. 1 vol. avec 96 figures.. 2 fr.
2e partie. MÉTAUX ET MÉTALLURGIE. 1 vol. avec 46 figures........... 2 fr.
3e partie. CHIMIE ORGANIQUE. 1 vol. avec 32 figures................ 2 fr.

PELOUZE ET **FREMY**. — **Traité de chimie générale, analytique, industrielle et agricole.** 3e édition, entièrement refondue, avec nombreuses figures dans le texte. Cette troisième édition comprend

sept volumes grand in-8 compactes et 1 table alphabétique générale formant un volume à part. Prix de l'ouvrage complet........... 100 fr.

PELOUZE et FREMY. — Notions générales de chimie. Paris, 1853. Un beau volume imprimé avec luxe, accompagné d'un atlas de 24 planches en couleur, cartonné.............................. 10 fr.

— *Le même ouvrage*, édition classique, avec 24 planches en noir... 5 fr.

PERIER (J. A. N.). — Fragments ethnologiques; études sur les vestiges des peuples gaëlique et cymrique dans quelques contrées de l'Europe occidentale, etc. Paris, 1857, brochure grand in-8....... 3 fr. 50

PERRIS (Ed.). — Histoire des insectes du pin maritime. Tome I, *Coléoptères*. Paris, 1863, in-8, avec 12 planches....... 25 fr.

PERSOZ. — Traité théorique et pratique de l'impression des tissus. Paris, 1846, 4 beaux vol. in-8, avec 165 figures et 429 échantillons d'étoffes, intercalés dans le texte, et accompagnés d'un atlas de 10 planches in-4 gravées en taille-douce, dont 4 sont coloriées. Ouvrage auquel la Société d'encouragement a accordé une médaille de 3,000 fr... 70 fr.

PERSOZ (J.). — Nouveau procédé de culture de la vigne. Paris, 1849, brochure grand in-8, avec deux planches in-4.. 1 fr. 50

PÉTREQUIN (J. E.). — Traité d'anatomie topographique médico-chirurgicale, considérée spécialement dans ses applications à la pathologie, à la médecine légale, à l'art obstétrical et à la chirurgie opératoire. 2e édition. Paris, 1857, 1 vol. grand in-8.................. 9 fr.

POUCHET (F. A.). — Nouvelles expériences sur la génération spontanée et la résistance vitale. Paris, 1864, 1 vol. in-8, avec 20 fig. dans le texte et une planche coloriée................... 7 fr. 50

POUCHET (G.). — Précis d'histologie humaine d'après les travaux de l'École française. Paris, 1864, 1 vol. in-8, avec figures dans le texte.. 6 fr.

POUCHET (G.). — De la pluralité des races humaines; essai anthropologique. 2e édition. Paris, 1864, 1 vol. in-8.......... 3 fr. 50

POUCHET (Georges). — Mémoires sur le grand fourmilier (*Myrmecophaga jubata*, Linné). Paris, 1868, 1 vol. gr. in-4, avec 16 planches lithographiées par M. Leveillé.......................... 35 fr.

PREVOST. — De la déviation conjuguée des yeux et de la rotation de la tête dans certains cas d'hémiplégie. Paris, 1868, 1 vol. gr. in-8.. 2 fr. 50

QUATREFAGES (A. de). — Souvenirs d'un naturaliste. Paris, 1854, 2 vol. in-18.. 4 fr.

QUATREFAGES (A. de). — Études sur les maladies actuelles du ver à soie. Paris, 1859, 1 vol. in-4, avec 6 planches imprimées en couleur et retouchées au pinceau.......................... 16 fr.

— **Nouvelles recherches faites en 1859** sur les maladies actuelles du ver à soie. Paris, 1860, 1 vol. in-4........................ 3 fr. 50

RAIMBERT. — Traité des maladies charbonneuses. Paris, 1857, 1 vol. in-8.. 6 fr.

REGNAULT. — Cours élémentaire de chimie. 6e édition. Paris,

1868, 4 vol. grand in-18, avec 2 planches en taille-douce et 700 figures dans le texte .... 20 fr.

REGNAULT. — **Premiers éléments de chimie.** 4e édition. Paris, 1861, 1 vol. grand in-18, avec 142 figures dans le texte........... 5 fr.

RENDU (VICTOR). — **Ampélographie française,** ou **Traité de la vigne,** comprenant la statistique, la description des meilleurs cépages, l'analyse chimique du sol et les procédés de culture et de vinification des principaux vignobles de la France. Paris, 1857, 1 vol. de texte in-folio et un atlas de 70 planches magnifiquement coloriées........... 150 fr.

— *Le même ouvrage*, le texte seul. 1 beau vol. grand in-8, avec une carte.. 6 fr.

RESBECQ (DE FONTAINE DE). — **Guide administratif et scolaire** dans les Facultés de médecine, les Écoles supérieures de pharmacie et les Écoles préparatoires du même ordre. Agrégation, professorat, études, grades de docteur en médecine, d'officier de santé, de pharmacien, de sage-femme et d'herboriste; suivi d'une analyse chronologique des lois, statuts, décrets, règlements et circulaires relatifs à l'enseignement de la médecine et de la pharmacie, de 1791 à 1860. Paris, 1860, 1 vol. in-18. 3 fr.

ROBINEAU. — **Histoire naturelle des Diptères des environs de Paris.** Ouvrage posthume publié par M. MONCEAUX. 2 vol. in-8. 30 fr.

ROGUET. — **Cours de mathématiques** à l'usage des établissements d'enseignement spécial et de l'enseignement classique secondaire.

En vente :

— ARITHMÉTIQUE. Paris, 1867, 1 vol. petit in-8.................... 3 fr.
— GÉOMÉTRIE. Année préparatoire. Paris, 1867, 1 vol. petit in-8, avec figures dans le texte.. 1 fr.

Sous presse :

— GÉOMÉTRIE. Première et deuxième année.

ROCCAS. — **Traité pratique des bains de mer** et de l'hydrothérapie marine, fondé sur de nombreuses observations. 2e édition. Paris, 1862, 1 vol. in-18.. 3 fr. 50

ROLLET (J.). — **Traité des maladies vénériennes.** Paris 1866, 1 fort vol. in-8 compacte.................................... 12 fr.

ROQUES (J.). — **Atlas des Champignons comestibles et vénéneux,** représentant les cent espèces ou variétés les plus répandues, avec un texte explicatif contenant la description détaillée des cent espèces, l'indication des lieux où elles croissent, leurs qualités alimentaires ou nuisibles. Extrait de la 2e édition. Paris, 1864, 1 atlas gr. in-4° de 24 planches coloriées.. 15 fr.

ROSE (H.). — **Traité complet de chimie analytique;** édition française originale. Paris, 1859-1862, 2 volumes grand in-8....... 24 fr.
Le premier volume est consacré à la chimie qualitative; le second à la chimie quantitative. Chacun est vendu séparément............... 12 fr.

ROSE-CHARMEUX. — **Culture du chasselas à Thomery.** Paris, 1862, 1 vol. in-18, avec 41 figures.............................. 2 fr.

ROTUREAU (A.). — **Des principales eaux minérales de l'Europe.** Paris, 1858-1864, 3 vol. in-8........................ 25 fr.

On peut avoir séparément :

— ALLEMAGNE ET HONGRIE. 1 vol. in-8.................... 7 fr. 50

— FRANCE ; ouvrage suivi de la législation sur les Eaux minérales. Paris, 1859, 1 vol. in-8... 10 fr.

— FRANCE (supplément), Angleterre, Belgique, Espagne et Portugal, Italie et Suisse. Paris, 1864, 1 vol. in-8.......................... 7 fr. 50

ROUSSEL. — **Système physique et moral de la femme** ; nouvelle édition, contenant une notice biographique sur Roussel et des notes, par le docteur CERISE. Paris, 1860, 1 vol. grand in-18............. 3 fr.

SACC. — **Essai sur la garance.** Paris, 1861, 1 broch. gr. in-8. 3 fr. 50

SAPPEY (C.). — **Traité d'anatomie descriptive.** Tome troisième, comprenant la **Splanchnologie** (digestion, respiration, sécrétion urinaire et génération). Paris, 1859-1864, 3 fasc. in-18, avec fig.... 7 fr. 50

SAUCEROTTE. — **L'histoire et la philosophie** dans leurs rapports avec la médecine. Paris, 1863, 1 vol. in-18................. 3 fr.

SAUSSURE (H. DE). — **Études sur la famille des Vespides.** 3 vol. et atlas divisés comme suit :

MONOGRAPHIE DES GUÊPES SOLITAIRES, ou de la tribu des Euméniens. Paris, 1852, 1 vol. grand in-8, avec atlas colorié de 22 planches........ 36 fr.

MONOGRAPHIE DES GUÊPES SOCIALES. Paris, 1860, 1 vol. grand in-8, avec atlas colorié de 39 planches... 66 fr.

MONOGRAPHIE DES MASARIENS. Paris, 1856, 1 vol. grand in-8, avec atlas colorié de 16 planches.. 42 fr.

SAUSSURE. — **Mémoires pour servir à l'histoire naturelle du Mexique, des Antilles et des États-Unis.**

1re livraison. CRUSTACÉS. 1858, in-4, avec 6 planches................ 9 fr.

2e livraison. MYRIAPODES. 1860, in-4, avec 7 pl., dont 1 coloriée..... 16 fr.

3e et 4e livraisons. ORTHOPTÈRES. Blattides. Paris, 1865, in-4, avec 2 pl. 20 fr.

SAUSSURE (H. DE). — **Mélanges hyménoptérologiques,** 1er et 2e fascicules. In-4, avec planches coloriées. Prix de chaque fascicule.. 6 fr.

SAUSSURE (H. DE). — **Mélanges orthoptérologiques.** 1er fascicule. In-4, avec planches coloriées.................................. 6 fr.

SAUSSURE ET **SICHEL.** — **Catalogus specierum generis scolia** (sensu latiori), continens specierum diagnoses, descriptiones synonymiamque, etc. Paris, 1864, 1 vol. in-8, avec 2 planches coloriées. 8 fr.

SAUZE (ALFRED). — **Études médico-psychologiques sur la folie.** Paris, 1862, 1 vol. in-8..................................... 5 fr.

SCANZONI. — **De la métrite chronique** ; traduit de l'allemand par le docteur SIEFFERMANN. Paris, 1866, 1 vol. in-8.............. 7 fr.

SCANZONI. — **Précis théorique et pratique de l'art des accouchements** ; traduit par le docteur P. PICARD. Paris, 1859, 1 vol. grand in-18, avec 111 figures dans le texte........................ 5 fr.

SCHOEDLER. — *Voy.* le LIVRE DE LA NATURE.

SCHREBER. — **Gymnastique de chambre** médicale et hygiénique, ou Représentation et description de mouvements gymnastiques n'exigeant aucun appareil ni aide et pouvant s'exécuter en tout temps et en tous lieux. 2e édit. Paris, 1867, 1 vol., avec 45 figures............... 3 fr.

SCHUTZENBERGER (P.). — **Chimie appliquée à la physiologie animale, à la pathologie et au diagnostic médical.** Paris, 1864, 1 vol. in-8.. 6 fr.

SCHUTZENBERGER (P.). — **Traité des matières colorantes,** comprenant leurs applications à la teinture et à l'impression, publié sous les auspices de la Société industrielle de Mulhouse, et avec le concours du Comité de chimie. Paris, 1867, 2 vol. in-8, avec fig. et échantillons. 19 fr.

SCRIVE. — **Relation médico-chirurgicale de la campagne d'Orient,** de 1854 à 1856. Paris, 1857, 1 vol. in-8............. 3 fr.

SCROPE (POULETT). — **Les Volcans,** leurs caractères et leurs phénomènes, avec un catalogue descriptif de toutes les formations volcaniques aujourd'hui connues ; ouvrage traduit de l'anglais par E. PIERAGGI. Paris, 1864, 1 vol. in-8, relié à l'anglaise, avec deux planches coloriées et figures dans le texte.. 14 fr.

SEGOND (L. A.). — **Programme de morphologie,** contenant une classification nouvelle des mammifères. Paris, 1862, 1 vol. in-8... 3 fr.

SERINGE (N. C.). — **Description, culture et taille des mûriers,** leurs espèces et leurs variétés. Paris, 1855, 1 vol. grand in-8, avec figures dans le texte, accompagné d'un atlas in-4 de 27 planches........ 9 fr.

SERRE (d'Uzès). — **Essais sur les phosphènes** ou anneaux lumineux de la rétine considérés dans leurs rapports avec la physiologie de la vision. Paris, 1861, 1 vol. in-8, avec figures dans le texte.............. 5 fr.

SICHEL (JULIUS). — *Voy.* SAUSSURE.

SICHEL. — **Études hyménoptérologiques.** 1er fascicule, avec 2 pl. coloriées.. 5 fr.

SILBERT (d'Aix). — **Traité pratique de l'accouchement prématuré artificiel,** comprenant son histoire, ses indications, l'époque à laquelle on doit le pratiquer, et le meilleur moyen de le déterminer. Paris, 1855, 1 vol. in-8.................................. 2 fr. 75

SILBERT (d'Aix). — **De la saignée dans la grossesse.** Paris, 1857, 1 vol. in-8.. 4 fr. 50

SIMON (M.). — **De la préservation du choléra épidémique.** Paris, 1865, 1 vol. in-18.................................. 2 fr. 50

SIMS. — **Notes cliniques sur la chirurgie utérine,** par le D. *Marion Sims ;* traduit de l'anglais par M. Lhéritier, médecin inspecteur des eaux de Plombières. Paris, 1866, 1 vol. in-8, avec fig. dans le texte. 9 fr.

SOCIÉTÉ anatomique. (*Voy.* page 5.)

SOCIÉTÉ impériale d'acclimatation. (*Voy.* page 31.)

SOCIÉTÉ d'anthropologie (Mémoires de la), publiés dans le format

grand in-8. Les tomes I et II, avec planches, cartes et portraits, sont en vente. Prix de chaque volume.. 12 fr.
— *Franco* par la poste... 13 fr.

Le volume est fourni aux souscripteurs en quatre fascicules qui paraissent à des intervalles indéterminés. Le prix de chaque volume est payable en retirant le premier fascicule. Le premier fascicule du 3e volume a paru.

— **Bulletin de la Société.** (*Voy.* aux *Publications périodiques*, page 31.)

SOCIÉTÉ de chirurgie de Paris (Mémoires de la), publiés dans le format in-4. Prix de chaque vol. avec planches.................. 20 fr.
— *Franco* par la poste... 23 fr.
Les tomes II à VII sont en vente. Le tome VIII est en cours de publication.

Le volume est fourni aux souscripteurs en cinq ou six fascicules qui paraissent à des intervalles indéterminés. Le prix de chaque volume est payable en retirant le premier fascicule.

— **Discussion sur l'hygiène et la salubrité des hôpitaux.** Paris, 1865, in-8.. 2 fr. 50

— **Bulletin de la Société.** (*Voy.* aux *Publications périodiques*, p. 31.)

SOUBEIRAN. — Traité de pharmacie théorique et pratique. 6e édit. Paris, 1863, 2 forts vol. in-8, avec figures dans le texte. 17 fr.

SOUBEIRAN. — Précis élémentaire de physique. 2e édit., augmentée. Paris, 1844, 1 vol. in-8, avec 13 planches in-4........... 5 fr.

THENARD. — Notice sur le vinage des vins en franchise des droits sur l'alcool qui lui est consacré. Paris, 1864, br. gr. in-8. 1 fr. 50

THIBIERGE (A.) ET REMILLY. — De l'amidon du marron d'Inde et des fécules amylacées d'autres substances végétales non alimentaires aux points de vue économique, chimique, agricole et technique. 2e édition. Paris, 1857, 1 vol. in-18, avec planches gravées. 1 fr.

TISSERAND (Eug.). — Études économiques sur le Danemark, le Holstein et le Sleswig. Paris, 1865, 1 vol. in-4, accompagné de 3 cartes et 10 planches lithogr.................................. 10 fr.

TISSOT. — L'Animisme, ou la Matière et l'esprit conciliés par l'identité de principe et la diversité des fonctions dans les phénomènes organiques et psychiques. Paris, 1865, 1 vol. in-8.................. 7 fr. 50

TISSOT. — La Vie dans l'homme ; tome I, Psychologie expérimentale. Paris, 1861, 1 vol. in-8.................................. 7 fr. 50

TISSOT. — La Vie dans l'homme ; tome II, Psychologie rationnelle. Paris, 1861, 1 vol. in-8.. 7 fr. 50

TISSOT (A.). — Précis de cosmographie (*de la collection du Baccalauréat ès sciences*). 2e édition conforme aux nouveaux programmes. 1 vol. in-18, avec figures dans le texte.......................... 1 fr. 60

— **Précis de géométrie descriptive,** *de la même collection*, 2e édition conforme aux nouveaux programmes. 1 vol. in-18, avec figures dans le texte.

— **Leçons d'arithmétique,** à l'usage des classes de troisième et de mathématiques élémentaires première année. 1 vol. petit in-8. 2 fr. 80

TRACY (Victor de). — Lettres sur la vie rurale. 2e édition. Paris, 1861, 1 vol. in-18.. 1 fr.

TRIPIER (L.). — **Du cancer de la colonne vertébrale**, et de ses rapports avec la paraplégie douloureuse. Paris, 1867, 1 vol. in-8. 3 fr.

TROOST (L.). — **Traité élémentaire de chimie,** comprenant les applications à l'hygiène, aux arts et à l'industrie. 1 vol. grand in-18, avec figures dans le texte.. 6 fr.

TROOST. — **Précis de chimie** (*de la collection du Baccalauréat ès sciences*), 2e édition, rédigée conformément aux nouveaux programmes. et suivie de quelques notions de chimie organique. Paris, 1867, 1 vol. in-18, avec figures.. 3 fr.

UNGER (F.). — **Le monde primitif à ses différentes époques de formation.** Seize gravures avec texte explicatif. 2e édition, revue et augmentée de deux gravures. Leipzig et Paris, 1860, gr. in-plano.... 86 fr.

VACCA. — **Leçons de physique** rédigées conformément aux programmes pour l'enseignement spécial.
Première année, 1 vol. petit in-8 avec figures.
Deuxième année, 1 vol. petit in-8 avec figures.
Troisième année, 1 vol. petit in-8 avec figures.

VACQUANT (T.). — **Précis de géométrie,** *de la collection du Baccalauréat ès sciences*). 2e édit. rédigée conformément aux nouveaux programmes et suivie des applications par M. Tissot. Paris, 1868, 1 vol. in-18, avec figures.. 2 fr. 60

VARENNES (P. J. de). — **Les veillées de la ferme du Tourne-Bride,** ou Entretiens sur l'agriculture, l'exploitation des produits agricoles et l'arboriculture. 2e édition. Paris, 1867, 1 vol. in-12, avec fig. dans le texte.. 1 fr.

VELPEAU. — **Traité des maladies du sein et de la région mammaire.** 2e édition. Paris, 1858, 1 vol. in-8, avec figures dans le texte et 8 planches gravées.. 12 fr.

VERDEIL. — **De l'industrie moderne.** Paris, 1861, 1 vol. in-8. 7 fr. 50

VERDET (Œuvres d'E.), publiées par les soins de ses élèves. 8 volumes gr. in-8 raisin, avec figures dans le texte, et imprimés avec luxe par l'Imprimerie impériale.
Prix pour les souscripteurs à l'ouvrage complet.................. 75 fr.
On peut avoir séparément :

Tome I. **Introduction**, par M. de la Rive, mémoires originaux... 12 fr.

Tomes II et III. **Cours de physique** professé à l'École polytechnique, publié par M. E. Fernet, répétiteur à l'École polytechnique. 2 vol. grand in-8, avec fig. dans le texte.. 24 fr.

Tome IV. **Conférences de physique** faites à l'École normale, publiées par M. A. Gerny, ancien élève de l'École normale. 1 vol in-8, avec fig. 12 fr.

Tomes V et VI. **Leçons d'optique physique**, publiées par M. Levistal, ancien élève de l'École normale. 2 vol. grand in-8, avec figures dans le texte. 24 fr.

Tomes VII et VIII. **Théorie mécanique de la chaleur,** pnbliée par M. A. Prudhon et Violle, ancien élève de l'École normale. 2 vol. grand in-8, avec figures dans le texte.. 24 fr.

VERDO. — **Précis sur les eaux minérales des Pyrénées.** 2e édition. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18, avec une carte.... 3 fr. 50

VERGER (Le). — **Publication périodique d'arboriculture et de pomologie**, dirigée par M. Mas. Paraissant depuis janvier 1865. (Voir aux *Publications périodiques*, p. 32.)

VOILLEMIER. — **Traité des maladies des voies urinaires. Maladies de l'urètre**. Paris, 1868, 1 beau vol. gr. in-8 compacte, avec 86 figures dans le texte........................ 12 fr. 50

WEBB (P. B.). — **Otia hispanica,** seu Delectus plantarum rariorum aut nondum rite notarum per Hispanias sponte nascentium. Paris, 1853, 1 vol. petit in-folio, avec 45 planches gravées en taille-douce.... 30 fr.

WECHNIAKOFF (Th.). — **Recherches sur les conditions anthropologiques de la production scientifique et esthétique. Partie anthropologique.**

1er *fascicule.* Groupe polytypiques et monotypique. 1 vol. in-8...... 3 fr.
2e *fascicule.* Groupe philosophique. 1 vol. in-8.................. 3 fr.

WECKHERLIN (A. de). — **Zootechnie générale,** Reproduction, amélioration, élevage des animaux domestiques. Traduit de l'allemand par M. Verheyen. Paris, 1857, 1 vol. grand in-18............... 2 fr.

WILM. — (*Voy.* Odling.)

WURTZ (Ad.). — **Traité élémentaire de chimie médicale,** comprenant quelques notions de toxicologie, et les principales applications de la chimie à la physiologie, à la pathologie, à la pharmacie et à l'hygiène.

I. Chimie inorganique. 2e édition. Paris, 1868, 1 vol. in-8, avec figures. 8 fr.
II. Chimie organique. Paris, 1865, 1 vol. in-8, avec figures........ 8 fr.

WURTZ (Ad.). — **Leçons élémentaires de chimie moderne.** Paris, 1868. 1 vol. in-18, avec nombreuses fig.................... 7 fr.

ZAGIEL (le Prince Ignace). — **Du climat de l'Égypte et de son influence sur le traitement de la phthisie pulmonaire.** Paris, 1866, 1 vol. in-8, avec une carte coloriée......................... 4 fr.

ZIMMERMANN. — **La solitude.** Traduction nouvelle par X. Marmier. Paris, 1855, 1 vol. grand in-18............................... 3 fr.

PUBLICATIONS PÉRIODIQUES.

(Voir, sur la couverture du Catalogue, les conditions d'abonnements pour l'étranger.)

Annales de chimie, par MM. GUYTON DE MORVEAU, LAVOISIER, MONGE, BERTHOLLET, FOURCROY, etc. Paris, 1789 à 1815 inclusivement, 96 volumes in-8, figures, et 3 vol. de tables.

Les collections complètes de cette première série sont rares.

Les 3 volumes de table séparément .... 24 fr.

Annales de chimie et de physique, IIe série, par MM. GAY-LUSSAC et ARAGO. Paris, 1816 à 1840, 25 années, formant avec les tables 78 vol. in-8, accompagnés d'un grand nombre de planches gravées ..... 400 fr.

— Table générale raisonnée des matières comprises dans les tomes I à LXXV (1816 à 1840). 3 vol. in-8, pris séparément .... 20 fr.

Annales de chimie et de physique, IIIe série, commencée en 1841, rédigée par MM. CHEVREUL, DUMAS, PELOUZE, BOUSSINGAULT, REGNAULT et DE SÉNARMONT, avec une revue des travaux de chimie et de physique publiés à l'étranger par MM. WURTZ et VERDET. Paris, 1841 à 1863, 23 années en 69 vol., avec figures dans le texte et planches gravées... 690 fr.

— Table générale raisonnée des matières contenues dans les tomes I à XXX de la IIIe série. Paris, 1851, 1 vol. in-8 .... 5 fr.

— Table analytique des tomes XXXI à LXIX (1851 à 1863). Paris, 1866, 1 vol. in-8 .... 10 fr.

Annales de chimie et de physique, IVe série, commencée en 1864, par MM. CHEVREUL, DUMAS, PELOUZE, BOUSSINGAULT, REGNAULT, avec la collaboration de M. WURTZ.

Il paraît chaque année 12 cahiers qui forment 3 volumes et sont accompagnés de planches en taille-douce et de figures intercalées dans le texte.

Prix de l'année:	Pour Paris	30 fr.
	Pour les départements (*par la poste*)	34 fr

Annales des sciences naturelles. Ire série, 1824 à 1833 inclusivement, publiée par MM. AUDOUIN, AD. BRONGNIART et DUMAS. 30 vol. in-8, 600 planches environ .... 300 fr.

Toutes les années séparément (*moins* 1830) .... 30 fr.

— Table générale des matières des 30 vol. qui composent cette série. Paris, 1841, 1 vol. in-8 .... 8 fr.

Annales des sciences naturelles, comprenant la zoologie, la bota-

nique, l'anatomie et la physiologie comparées des deux règnes et l'histoire des corps organisés fossiles.

— II[e] SÉRIE (1834 à 1843), rédigée, pour la zoologie, par MM. AUDOUIN et MILNE-EDWARDS; pour la botanique, par MM. AD. BRONGNIART, GUILLEMIN et DECAISNE.

— III[e] SÉRIE (1844 à 1853), rédigée, pour la zoologie, par M. MILNE-EDWARDS; et pour la botanique, par MM. AD. BRONGNIART et DECAISNE.

— IV[e] SÉRIE (1854 à 1863), rédigée, pour la zoologie, par M. MILNE-EDWARDS, et pour la botanique, par MM. AD. BRONGNIART et DECAISNE.

Chacune des II[e], III[e] et IV[e] séries comprend 20 volumes pour la ZOOLOGIE, et 20 volumes pour la BOTANIQUE.

Prix des 20 volumes de l'une ou de l'autre série, format grand in-octavo, avec 350 planches environ.................................. 200 fr.

Quelques-unes des années peuvent être vendues séparément.
Prix des deux volumes.................................. 25 fr.

Annales des sciences naturelles, V[e] SÉRIE, commençant le 1[er] janvier 1864.

ZOOLOGIE ET PALÉONTOLOGIE, comprenant l'Anatomie, la Physiologie, la Classification et l'Histoire naturelle des animaux; publiées sous la direction de M. MILNE-EDWARDS.

Il est publié chaque année 2 volumes gr. in-8, avec environ 35 planches.

Prix de l'abonnement	Paris.............	25 fr.
	Départements.....	26 fr.

— BOTANIQUE, comprenant l'Anatomie, la Physiologie, la Classification et l'Histoire naturelle des végétaux; publiée sous la direction de MM. AD. BRONGNIART et J. DECAISNE.

Il est publié chaque année 2 volumes gr. in-8, avec 35 planches environ.

Prix de l'abonnement	Paris.............	25 fr.
	Départements	26 fr.

NOTA. — Dans cette V[e] série des *Annales des sciences naturelles*, la ZOOLOGIE et la BOTANIQUE forment chacune une publication distincte. Chaque partie est l'objet d'un abonnement séparé, indépendant de l'abonnement à l'autre partie.

Annales médico-psychologiques, journal de l'Anatomie, de la Physiologie et de la Pathologie du système nerveux, destiné particulièrement à recueillir tous les documents relatifs à la science des rapports du physique et du moral, à l'aliénation mentale et à la médecine légale des aliénés; publiées par MM. les docteurs BAILLARGER, médecin des aliénés à l'hospice de la Salpêtrière, CERISE et LONGET.

— I[re] SÉRIE, de 1843 à 1848, 12 volumes in-8, avec planches.... 120 fr.

— II[e] SÉRIE, 1849 à 1854, par BAILLARGER, BRIÈRE DE BOISMONT et CERISE. 6 vol. in-8.

— IIIe SÉRIE, 1855-1862, journal destiné à recueillir tous les documents relatifs à l'aliénation mentale, aux névroses et à la médecine légale des aliénés, par MM. BAILLARGER, MOREAU (de Tours) et CERISE.
8 vol. in-8.

— IVe SÉRIE, commençant en 1863; cette série paraît par cahiers bimensuels qui forment, à la fin de l'année, deux volumes in-8.

Prix de l'année :	Pour Paris...................................	20 fr.
	Pour les départements (*par la poste*).............	23 fr.

Archives de physiologie normale et pathologique, dirigées par MM. BROWN-SÉQUARD, CHARCOT et VULPIAN, paraissant tous les deux mois par fascicules, grand in-8 cavalier.
Prix de l'abonnement annuel : Paris et les départements....... 20 fr.

Bulletin mensuel de la Société impériale zoologique d'Acclimatation, fondée le 10 février 1854. IIe série, commencée en 1864.

Il paraît chaque année 12 cahiers formant un volume grand in-8 de 700 pages.

Le Bulletin est envoyé sans rétribution à tous les membres de la Société à partir du commencement de l'année où ils sont reçus.

Paris.............. 12 fr. | Départements....... 14 fr.

Bulletin de la Société d'anthropologie de Paris ; comprenant les procès-verbaux des séances, des notices, rapports, etc.
Il paraît chaque année, depuis 1860, 4 fascicules formant un volume in-8.

Paris.................... 7 fr. 50 | Départements............ 8 fr. 50

(*Voy.* page 25, **Mémoires de la Société d'anthropologie.**)

Bulletin de la Société de chirurgie de Paris.

Ire série, 1851 à 1860. 10 volumes in-8........................ 70 fr.

IIe série, commencée en 1861. Le tome VIII correspond à l'année 1868.

Paris.................... 7 fr. | Départements.......... 8 fr.

(*Voy.* page 26, **Mémoires de la Société de chirurgie.**)

Gazette hebdomadaire de médecine et de chirurgie. Rédacteur en chef : le docteur A. DECHAMBRE. IIe série, commencée en 1864.

La GAZETTE HEBDOMADAIRE, publiée dans le format in-4, paraît, depuis le octobre 1853, le vendredi de chaque semaine. Elle contient régulièrement, par numéro, 32 colonnes. Au bout de l'année, elle forme un beau tome de plus de 950 pages, avec figures.

Prix de l'abonnement : Paris et départements,

Un an, 24 francs. — Six mois, 13 francs. — Trois mois 7 francs.

Prix de chaque volume, comprenant les 52 numéros de l'année, avec titre et table alphabétique, broché, 25 fr.; avec une demi-reliure maroquin, 30 fr.

Pour la Ire série, voir page 15.

Journal de médecine mentale, résumant au point de vue médico-psychologique, hygiénique et légal toutes les questions relatives à la folie, aux névroses et aux défectuosités intellectuelles et morales, avec le concours des principaux aliénistes; par M. le docteur DELASIAUVE.

Le *Journal de médecine mentale* paraît mensuellement depuis 1861. Il forme chaque année 1 volume in-8.

Prix pour la France, 5 fr.; pour l'étranger, 6 fr.

Journal de pharmacie et de chimie, par MM. BOULLAY, BUSSY, HENRY, F. BOUDET, CAP, BOUTRON-CHARLARD, FREMY, GUIBOURT, BUIGNET, GOBLEY, LÉON SOUBEIRAN et POGGIALE; contenant une Revue médicale, par le Dr VIGLA, le Bulletin des travaux de la Société de pharmacie de Paris, et une Revue des travaux chimiques publiés à l'étranger par M. J. NICKLÈS, IVe série, ayant été commencée en janvier 1865.

Le *Journal de pharmacie et de chimie* paraît tous les mois par cahiers de 5 feuilles. Il forme chaque année deux volumes in-8; des planches sont jointes au texte toutes les fois qu'elles sont nécessaires.

Prix de l'abonnement pour Paris et les départements............ 15 fr.

Journal de l'agriculture, fondé et dirigé par J. A. BARRAL, fusionné à partir du 1er janvier 1867 avec le *Journal de la Ferme*, paraissant le 5 et le 20 de chaque mois, avec gravures et planches coloriées, et donnant en outre le samedi de chaque semaine un bulletin hebdomadaire. — Un an, 30 fr.; — six mois, 16 fr.; — trois mois, 8 fr. Le *Bulletin* seul, un an...................................... 8 fr.

LE VERGER. — Publication périodique d'arboriculture et de pomologie, dirigée par M. MAS, et paraissant depuis janvier 1865.

LE VERGER publie mensuellement une livraison de 16 pages de texte, contenant la description et la culture de huit variétés, et la représentation de chacune d'elles par la chromolithographie.

Il contient en outre une Revue mensuelle résumant les principaux faits qui se sont produits dans le domaine de l'Horticulture et de l'Arboriculture.

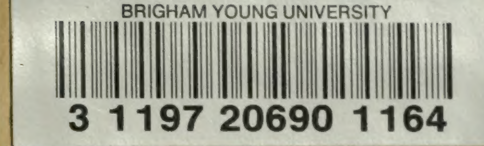
Prix de l'abonnement annuel, rendu franco dans la France...... 25 fr.

Pour l'Étranger, le port en sus.

Chacune des années complètes.............................. 25 fr.

CORBEIL, typ. et stér. de CRÉTÉ.

56


BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY
3 1197 20690 1164

